

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Automatizace měření aktivity radionuklidů pro monitorování kvality  
Automation of radionuclide activity measurements for an quality  
monitoring

Duben 2019

Stanislav Gaberle

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Stanislav Gaberle**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3901T009 Biomedicínské inženýrství

Téma:

Automatizace měření aktivity radionuklidů pro monitorování kvality  
Automation of Radionuclide Activity Measurements  
for an Quality Monitoring

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis technologie měření aktivity radionuklidů.
2. Popis technologií vhodných pro automatizaci měření z pohledu vestavěných platforem.
3. Popis komunikačních technologií a protokolů využitelných pro realizaci práce.
4. Výběr platformy pro sběr dat a realizace hardwaru ve formě funkčního vzorku.
5. Návrh softwaru pro vestavěnou platformu a jeho implementace do zařízení.
6. Návrh a aplikace metodiky statistického zpracování sbíraných dat pro systém monitorování kvality.
7. Zhodnocení výsledků a závěr práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. Praha: Středisko pro podporu studentů se specifickými potřebami ELSA ČVUT, 2015. ISBN 978-80-7232-383-8.
- [2] NELSON, Mark. *Serial communications developer's guide*. 2. ed. Foster City, CA [u.a.]: IDG Books Worldwide, 2000. ISBN 978-0764545702.
- [3] SAVILLE, David J. a Graham R. WOOD. *Statistical methods: a geometric primer*. New York: Springer, c1996. ISBN 978-0387947051.
- [4] MAGILL, Joseph a Jean GALY. *Radioactivity - radionuclides - radiation: including the Universal Nuclide Chart on CD-ROM*. New York, NY: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. ISBN 978-3540211167.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Prauzek, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: doc. Ing. Marek Penhaker, Ph.D.

Ing. Martin Stankuš, Ph.D.

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Jiří Kozíorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
*děkan fakulty*

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Hradci Králové 30. dubna 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jan Hájek', written in a cursive style.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval kolektivu zaměstnanců ONM FN Hradec Králové, jmenovitě pak zejména fyzikům - RNDr. Drahomíře Pecinové, Ph.D. a Ing. Jiřímu Kulířovi za jejich čas a obětavou spolupráci, bez nichž by nemohla tato diplomová práce vzniknout a dále Petru Česenkovi, DiS., ze společnosti ČESENEK s.r.o. za pomoc při sestavování a odladování finálního kódu programu.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá možnostmi automatizace měření aktivity radionuklidů v rutinním provozu Oddělení nukleární medicíny Fakultní nemocnice Hradec Králové. Jsou zde popsány možnosti automatizace měření a jejich následného vyhodnocování pro účely kontroly kvality. V praktické části je navržen a sestrojen prototyp zařízení pro automatický sběr dat včetně nezbytného programového vybavení.

**Klíčová slova:** *radioaktivita, radionuklid, nukleární medicína, dávkový kalibrátor, systém kvality*

## **Abstract**

This thesis deals with possibilities of automation measurement of radionuclide activity in the routine operation in the Department of Nuclear Medicine of the University Hospital Hradec Králové. There are described possibilities of measurements automation and their subsequent evaluation for quality control purposes. In the practical part, a prototype of a device for automatic data acquisition including the necessary software is designed and built.

**Key words:** *radioactivity, radionuclide, nuclear medicine, dose calibrator, quality management*

## Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých symbolů a zkratk .....	8
Veličiny a jednotky .....	9
Seznam obrázků a tabulek.....	10
Úvod.....	11
1 Radionuklidy .....	12
1.1 Radionuklidy v nukleární medicíně .....	13
2 Měření aktivity radionuklidů.....	14
2.1 Dělení detektorů záření .....	14
2.2 V-A charakteristika .....	15
2.3 Ionizační komory .....	16
2.4 Studnové detektory.....	17
3 Přístroj Curiementor.....	18
3.1 SW Curiementor.....	20
3.2 Komunikační rozhraní.....	21
3.3 Komunikační protokol.....	23
3.3.1 Telegramy .....	23
3.3.2 Chybová hlášení .....	25
4 Praktická část .....	26
4.1 Motivace.....	26
4.2 Technologie automatizace.....	28
4.3 Možnosti komunikace .....	29
4.4 Experimentální etapa.....	31
4.5 CuriementorLogger .....	34
5 CuriementorApp.....	39
5.1 GUI CuriementorApp.....	42
6 CuriementorStat .....	44
7 Cenová kalkulace .....	48
8 Legislativa a bezpečnost.....	49
9 EMC a zabezpečení dat.....	50
10 Diskuze.....	51
Závěr .....	52
Literatura .....	53
Seznam příloh.....	58

## Seznam použitých symbolů a zkratek

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BTK	Bezpečnostně technická kontrola
CAM	Computer aided manufacturing
CE	Conformité européenne
DC	Direct Current
DIL	Dual in Line
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EN	Evropská norma
EU	Evropská unie
FN	Fakultní nemocnice
GPIO	General Purpose Input Output
GUI	Graphical User Interface
HW	Hardware
IEC	International Electrotechnical Commission
IO	Integrovaný obvod
I/O	Input/Output
LED	Light Emitting Diode
MDD	Medical Device
ONM	Oddělení nukleární medicíny
PAN	Personal Area Network
PET	Pozitronová emisní tomografie
QC	Quality Control
RAM	Random Access Memory
RIA	Radioimunoanalýza
RS-232	Recommended standard 232
RxD	Receive Data
SRAM	Static Random Access Memory
SW	Software
TTL	Transistor-transistor-logic
TxD	Transmit Data
USB	Universal Serial Bus
VBA	Visual Basic for Applications
VBE	Visual Basic Editor
ZPS	Zkouška provozní stálosti



## Veličiny a jednotky

A [Bq, Ci]	aktivita
C [F]	elektrická kapacita
d [m]	průměr
E [keV]	energie
f [Hz]	frekvence
I [A]	elektrický proud
I [B]	informace
P [Pa]	tlak
P [W]	elektrický výkon, elektrický příkon
R [ $\Omega$ ]	elektrický odpor
S [m <sup>2</sup> ]	plocha, průřez
T <sub>1/2</sub> [s]	poločas rozpadu
t [hod]	čas
U [V]	elektrické napětí
v [Bd, bit/s]	přenosová rychlost
v [-]	variační koeficient
$\bar{x}$ [-]	aritmetický průměr
$\lambda$ [s <sup>-1</sup> ]	rozpadová konstanta
$\sigma$ [-]	směrodatná odchylka
$\sigma^2$ [-]	rozptyl
$\tau$ [s]	časová konstanta

## Seznam obrázků a tabulek

- Obr. 1: Pokles aktivity radionuklidu v čase, převzato z [3].  
Obr. 2: V-A charakteristika detektorů záření, převzato z [7].  
Obr. 3: Konstrukce ionizačních komor (souosé a paralelní desková, tzv. PPIC), převzato z [9].  
Obr. 4: Princip funkce ionizační komory, převzato z [10].  
Obr. 5: Přístroj Curiementor, převzato z [16].  
Obr. 6: Ovládací panel Curiementor 4, převzato z [11].  
Obr. 7: Náhled SW pro komunikaci s přístrojem Curiementor, převzato z [18].  
Obr. 8: Náhled SW CuriementorControl, výrobce VKlab s.r.o.  
Obr. 9: Zapojení RS-232, převzato z [19].  
Obr. 10: Termošíttek.  
Obr. 11: Kalibrační křivka ZPS.  
Obr. 12: Blokové schéma mikrokontroléru, převzato z [28].  
Obr. 13: Sériová asynchronní komunikace, převzato z [29].  
Obr. 14: Blokové schéma experimentálního řešení.  
Obr. 15: Blokové schéma funkčního vzorku.  
Obr. 16: Náznorné zapojení převodníku řady MAX232, převzato z [44].  
Obr. 17: Náznorné zapojení modulu ESP-WROOM-02, převzato z [49].  
Obr. 18: Elektrické schéma HW části.  
Obr. 19: Elektrické schéma napájecí části.  
Obr. 20: DPS, lícová strana (pohled TOP – ze strany součástek).  
Obr. 21: Funkční vzorek.  
Obr. 22: Myšlenková mapa - struktura aplikace CuriementorApp.  
Obr. 23: Náhled GUI.  
Obr. 24: Načtené hodnoty v \*.csv formátu.  
Obr. 25: Blokové schéma CuriementorStat.  
Obr. 26: Gaussova křivka a pravidlo  $3\sigma$ , převzato z [55].  
Obr. 27: Křivky měření ZPS.  
Obr. 28: Vnější vzhled funkčního vzorku.  
Obr. 29: Diskuze.

- Tab. 1: Data SW Curiementor.  
Tab. 2: Zapojení pinů RS-232, převzato z [17].  
Tab. 3: Změřené hodnoty ZPS.  
Tab. 4: Chybovost při měření ZPS.  
Tab. 5: Indikace stavů experimentálního řešení.  
Tab. 6: Seznam součástek.  
Tab. 7: Princip pojmenování výstupního souboru.  
Tab. 8: Struktura aplikace CuriementorApp.  
Tab. 9: Položkový rozpočet.

## Úvod

Podstatou diagnostických i terapeutických metod v nukleární medicíně a některých oborech onkologie<sup>1</sup> je využití radiofarmak. Jedná se o specifická léčiva, jejichž obsahem jsou radionuklidy (radioizotopy). Tato skutečnost s sebou nese jednak riziko nežádoucího ozáření (jak personálu, tak pacientů) a zároveň problém s proměnou aktivitou radionuklidů, která není v čase konstantní (exponenciálně klesá), čímž se zásadně mění složení léčiva. Z těchto důvodů je nutné dbát na správnou kontrolu a nastavení systému kvality ve všech fázích procesu zacházení s těmito zdravotnickými prostředky – při jejich výrobě, přípravě, distribuci, skladování, použití i likvidaci.

Teoretická část této práce definuje základní veličiny a jednotky užívané v souvislosti s radionuklidy, dále popisuje nejrozšířenější radionuklidy užívané v současné medicíně. Jsou zde popsány fyzikální principy měření aktivity radionuklidů, dělení detektorů záření s důrazem na podstatu a vlastnosti ionizačních komor a zvláště studnových detektorů. Samostatná kapitola je věnována popisu konkrétních studnových detektorů – přístrojů řady Curiementor. Jsou zde popsány základní vlastnosti, ovládání, komunikační rozhraní, příkazy pro komunikaci s okolím i možná chybová hlášení.

Dále jsou teoreticky popsány prostředky pro automatizaci sběru dat z pohledu vestavěných platforem, protokoly pro drátovou i bezdrátovou komunikaci, využitelné pro účely této práce, jejich výhody a nevýhody s přihlédnutím ke specifickým sběru dat konkrétního radiometru a současným trendům v této problematice.

Praktická část práce popisuje návrh a výrobu dataloggeru a nezbytného programové vybavení pro vyčítání a export dat. Jsou popsány možnosti realizace hardwarové části i struktura programu. Samostatná kapitola se věnuje návrhu funkčního vzorku.

V závěrečné kapitole jsou popsány návrh a aplikace metodiky statistického zpracování sebraných dat z hlediska systému monitorování kvality. Jsou zde navrženy postupy eliminace hrubých chyb a způsoby, jakými lze data prezentovat.

V diskuzi jsou zhodnoceny výsledky práce a uvedeny výhody a nevýhody vytvořeného řešení, popsány přínosy pro obsluhu pracoviště a poznatky z prvotního testovacího provozu.

---

<sup>1</sup> Zejména brachyterapie.

# 1 Radionuklidy

Radionuklidy (nesprávně radioizotopy<sup>2</sup>) jsou takové prvky, které jsou schopné samostatné radioaktivní přeměny jader za vzniku radioaktivního záření. Přírodních radionuklidů známe cca 50, jelikož se některé radionuklidy mohou následně dále rozpadat, je jejich celkový známý počet cca 2000. Rozpad radionuklidu je popsán tzv. *rozpadovou řadou*, dalšími hlavními charakteristikami radionuklidů jsou aktivita  $A$ , poločas rozpadu  $T_{1/2}$  a druh radioaktivní přeměny [1].

Rozpadová (radioaktivní) řada je řada přeměny radioaktivního izotopu prvku v nestabilním stavu na izotop stabilní za současného vyzáření  $\alpha$  nebo  $\beta$ .

Aktivita radionuklidu  $A$  udává počet přeměn  $N$  za určitý čas  $t$  (1):

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Dále platí zákon radioaktivního rozpadu, kde  $N$  je počet produktů,  $N_0$  počet vstupujících vzorků,  $\lambda$  rozpadová konstanta a  $t$  čas (2):

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Platí, že počet jader radionuklidu klesá úměrně s aktivitou. Spojením (1) a (2) získáme vztah pro aktuální aktivitu (3):

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Jednotkou je 1 Bq, který představuje právě jednu přeměnu za sekundu. Pro praxi je jednotka příliš malá, častěji se aktivita udává v násobcích (kBq, resp. GBq). Dříve a v některé literatuře je použita jednotka Ci, jehož aktivita je odvozena od aktivity jednoho gramu <sup>228</sup>Ra [2]. Přibližný přepočtení (4):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ GBq}$$

1 Ci je tedy přibližně roven aktivitě 37 GBq.

Aktivita radionuklidu přímo úměrně souvisí s jeho množstvím a nepřímo úměrně s časem uplynutým od jeho vzniku.

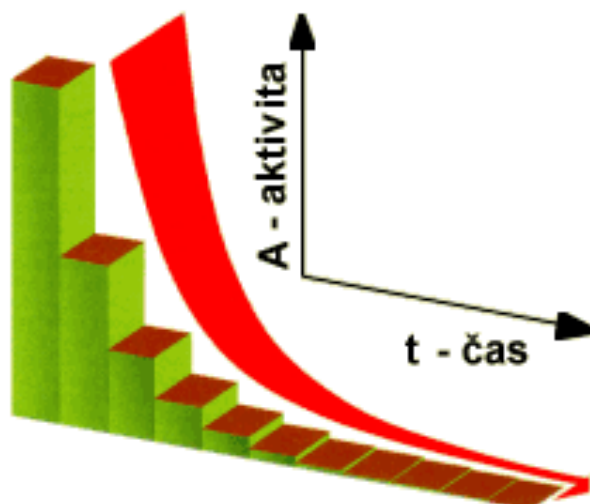
Poločas rozpadu  $T_{1/2}$  kvantitativně popisuje rozpad ve velkém souboru radioaktivních prvků. Jedná se o specifický atribut každého izotopu, který je nezávislý na okolních fyzikálních podmínkách, jeho hodnota je od zlomků sekundy po tisíce let. Matematicky jej lze vyjádřit (5):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

kde  $\lambda$  je rozpadová konstanta. Graficky lze pokles aktivity v čase prezentovat dle obr. 1. Dle druhu radioaktivní přeměny lze rozpad radionuklidu dělit na  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a ionizující záření.

---

<sup>2</sup> Starší označení pro radionuklid. Dnes je pojem radioizotop vztažen jen ke konkrétnímu prvku.



Obr. 1: Pokles aktivity radionuklidu v čase, převzato z [3].

Ionizující záření můžeme dále klasifikovat z hlediska intenzity, energie, prostorové distribuce či některých dalších vlastností [1]. Speciálními veličinami jsou aktivity vztažené na jednotkovou hmotnost zářiče (hmotnostní aktivita  $Bq.kg^{-1}$ ). U plošných zdrojů zavádíme plošnou aktivitu ( $Bq.m^{-2}$ ), analogicky u objemových zdrojů, jakými jsou plyny a kapaliny, zavádíme aktivitu objemovou ( $Bq.m^{-3}$ , resp.  $Bq.l^{-1}$ ). Speciálně pro radon je zavedena objemová aktivita radonu (*OAR*), resp. ekvivalentní objemová aktivita radonu *EOAR* [2].

### 1.1 Radionuklidy v nukleární medicíně

V nukleární medicíně jsou radionuklidy využívány v diagnostice i terapii. Používají se ke značení látek za účelem jejich následného sledování v živém organismu (např. transport, vychytávání). Metody můžeme rozdělit na kvalitativní (distribuce radionuklidů v tkáních, orgánech nebo buňkách) a kvantitativní (určení záření vzorku). Specifickým užitím radionuklidů v nukleární medicíně je dnes již ustupující laboratorní analýza RIA [4].

V diagnostice se pro scintilační metody dnes nejčastěji využívá  $^{99m}Tc$  ( $^{99m}Tc$ ). Tento radioizotop je lehce vyrobiteľný, s poločasem rozpadu 6 hodin a energií 140 keV. Pro vyšetření nádorů a zánětů se užívá  $^{67}Ga$  ( $^{67}Ga$ ). Hojně se užívá radionuklidů na bázi jódu ( $^{123}I$ ,  $^{125}I$ ,  $^{131}I$ ).

Pro PET je jako radiofarmakum využíván  $^{18}F$  ( $^{18}F$ ) ve formě  $^{18}F$ -FDG, což je deoxyglukosa (resp. thymidin), které jsou markovány  $\beta^+$  zářičem  $^{18}F$  s o energii 511 keV a poločasem rozpadu 109 minut.

Dále se pro diagnostiku užívají  $^{201}Tl$ ,  $^{111}In$ ,  $^{81m}Kr$ ,  $^{11}C$ ,  $^{13}C$ ,  $^{45}Ca$  a  $^{32}P$ .

V terapii onkologických nemocí se užívá radionuklidů s vysokou aktivitou a malým dosahem záření. Jedná se především o  $^{131}I$ ,  $^{90}Y$  a  $^{89}Sr$ .

<sup>3</sup> Písmeno *m* značí metastabilní stav jádra.

## 2 Měření aktivity radionuklidů

Ionizující záření je lidskými smysly nedetekovatelné. K jeho registraci je tedy nutný převod na jiné veličiny. Tento převod může být založen na fyzikálních či chemických procesech, případně jejich kombinacích. Přístroje pro měření ionizujícího záření se obecně nazývají *radiometry* [5][6].

### 2.1 Dělení detektorů záření

Detektory ionizujícího záření lze dělit dle třech hlavních parametrů:

#### 1) průběhu detekce v čase

Tyto detektory je možné dále dělit na kontinuální a integrální. *Kontinuální* detektory poskytují informaci o měřené veličině (intenzitě záření, počtu kvant) okamžitě (v reálném čase), výstupní veličina je tedy přímo úměrná velikosti aktuálního ozáření. Realizovány jsou téměř výhradně elektronicky. Naproti tomu detektory *integrální* poskytují informaci o kumulované dávce, kterou neustále přičítají k původní hodnotě (a to ve spojitém i nespojitém režimu). Tyto detektory fungují např. na principu zčernání fotocitlivé vrstvy, nejznámějšími jsou osobní filmové dozimetry. I tyto jsou však stále častěji nahrazovány elektronickými, které dokáží pracovat v kontinuálním i integrálním režimu.

#### 2) fyzikální podstaty detekce

Toto rozdělení zohledňuje fyzikální princip detekce. Nejstaršími, nejrozšířenějšími a nejlevnějšími jsou detektory *fotografické*, pracující na principu fotochemické přeměny dopadajícího záření na zčernání latentní vrstvy fotografické emulze či zobrazení stop částic v mlžné komoře. Druhou skupinou jsou *materiálové* detektory, založené na změně vlastností specifických látek (mimo detektorů fotografických). Těmito vlastnostmi mohou být např. složení, objem nebo barva. Obecnou nevýhodou obou výše uvedených skupin detektorů je poměrně malá citlivost, další společnou vlastností je pouze kumulativní režim měření. Třetí skupinou jsou detektory *elektronické*, které dopadající ionizující záření převádí na elektrický proud, resp. impulsy, které musí být následně elektronicky vyhodnocovány. Detektory pracující v proudovém režimu převádí záření na elektrický proud (řádově  $\mu A$  a menší), který je úměrný střední intenzitě dopadajícího záření. Impulsním režimem se rozumí převod interakce dopadající částice s prostředím na elektrický impuls (*cps* nebo *s<sup>-1</sup>*).

#### 3) komplexnosti měření

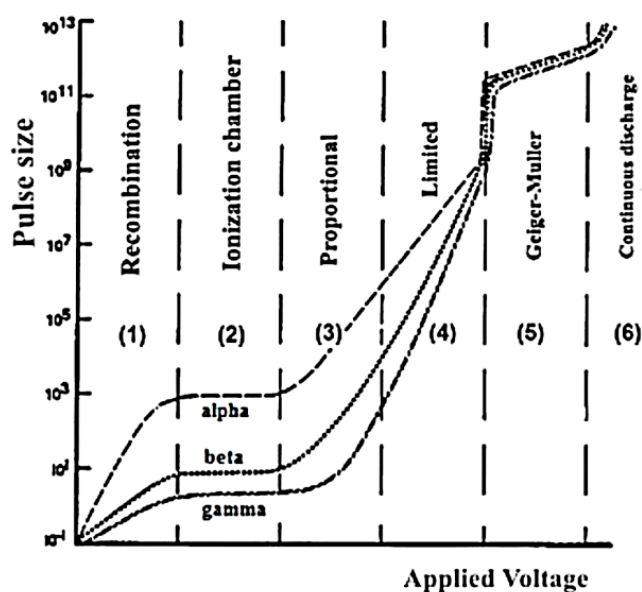
Nejjednodušší detektory dokáží měřit pouze intenzitu (jsou tzv. *radiačně citlivé*). Byť je tato veličina v praxi měřena nejčastěji a v technické praxi v mnoha ohledech postačuje (neboť jsou známy jak zdroj, tak energie záření), je ionizující záření charakteristické i dalšími, tzv. spektrometrickými veličinami. Spektrometry měří nejen intenzitu záření, ale i energetické spektrum (závislost intenzity na energii, jsou tedy *energeticky citlivé*). Zástupcem spektrometrů mohou být např. scintilační detektory, hojně užívané v nukleární medicíně. Dalším druhem zobrazení je *prostorové* rozložení intenzity záření. Asi nejznámějším zástupcem je dříve hojně používaný fotografický film nebo scintilační kamera, dnes obojí dostupné v elektronické verzi. Poslední speciální skupinou jsou *prostorově citlivé* detektory - dráhové detektory částic, které dokáží zobrazit dráhu letu jednotlivých částic v prostoru. Tyto detektory jsou opět buď analogové (mlžné komory) nebo nejnověji digitální.

Detektory lze rozlišovat i dle vzájemného uspořádání vzorku a detektoru, hovoříme o tzv. *geometrii měření*. Nejjednodušší zařízení obsahují pouze jeden detektor (např. osobní dozimetr), jejich nevýhodou je registrace záření pouze z jednoho (přímého) směru. Složitější tzv. *planární*

detektory dokáží registrovat záření z jedné poloviny, jsou označovány jako  $2p$ . Teoretická účinnost měření je 50%. Pro měření radionuklidů *in vitro* se v nukleární medicíně uplatní především detektory studnové, které zachytávají záření ze všech směrů (v plném prostorovém úhlu  $360^\circ$ )<sup>4</sup>. Tyto detektory měří v geometrii blízké  $4p$ .<sup>5</sup>

## 2.2 V-A charakteristika

Důležitým atributem detektorů ionizujícího záření je průběh jejich V-A charakteristiky. Za předpokladu konstantní intenzity záření lze **křivku** V-A charakteristiky rozdělit do třech úseků. V prvním platí Ohmův zákon, tedy přibližně lineární závislost proudu na napětí, ve druhé části již zvyšování napětí nevede ke zvyšování proudu (proud komorou je nasycen), v této oblasti leží pracovní bod ionizační komory. Ještě vyšší zvyšování napětí vede k nárazové ionizaci iontů, může docházet k ionizaci původně neutrálních molekul. Celý **průběh** V-A charakteristiky je možné rozdělit do šesti oblastí. První je oblast *rekombinace*, kdy při relativně nízkém napětí některé z iontových párů rekombinují a zkreslují tak měřenou hodnotu. Druhá oblast je oblast *nasyceného proudu*, iontové páry nemohou rekombinovat a všechny jsou nosičem elektrického proudu, v této oblasti není proud závislý na přiloženém napětí, ale pouze na intenzitě dopadajícího záření. Proto je tento úsek pracovní oblastí ionizačních komor. Ve třetím úseku se nadále zvyšuje napětí, což vede k akceleraci elektronů k anodě, elektrony mají dostatečnou energii, interagují s molekulami plynu a dochází k sekundární ionizaci a tím zvyšování proudu. Roste zesílení (až  $10^4$ ). Tato oblast se nazývá *proporcionální* a detekovat lze záření různých typů a energií. Zesílení ve čtvrté *nepřímo proporcionální* oblasti není lineární, k detekci záření se proto neúčívá. Pátá oblast je pracovní oblastí *Geiger-Müllerových čítačů*, neboť má velmi vysoké zesílení (až  $10^8$ ) a tedy i velkou citlivost na záření různých druhů a energií. Dalším zvyšováním napětí dochází k bombardování katody, neřízené ionizaci, doutnavému výboji v celé komoře a dalším nežádoucím jevům. Tato oblast se k detekci neúčívá. [7]



Obr. 2: V-A charakteristika detektorů záření, převzato z [7].

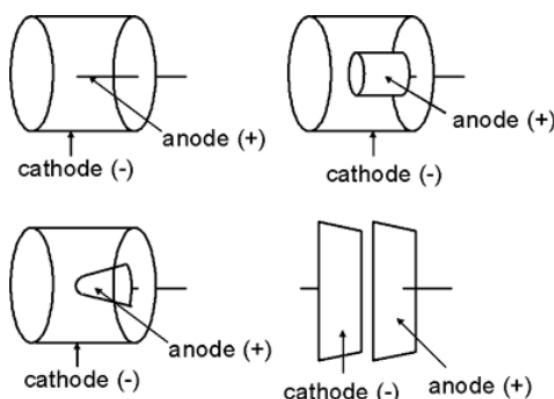
Přístroje využívající ionizační komoru mohou pracovat v režimu integrálním i impulzním.

<sup>4</sup> Toto označení je nepřesné, užívá se i starší jednotky plného prostorového úhlu sp (spat).

<sup>5</sup> Někdy značené i  $4\pi$ .

## 2.3 Ionizační komory

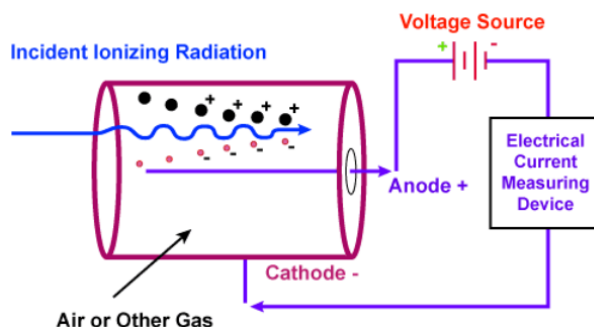
Jsou fyzikálně nejjednoduššími detektory ionizujícího záření [8], pracující v impulsním i kontinuálním režimu. Princip jejich činnosti je založen na vlastnostech ionizace ideálně inertního plynu v tzv. ionizační komoře (ionization chamber). Ta je tvořena komorou naplněnou za normálních okolností nevodivým vzácným plynem (zpravidla Ar, Kr, Xe,<sup>6</sup> a dvěma elektrodami (anodou a katodou)<sup>7</sup>, na které je přivedeno vysoké napětí (100 V až 2 kV v závislosti na objemu komory). Možná geometrická uspořádání ionizačních komor v závislosti na umístění elektrod uvádí obr. 3:



Obr. 3: Konstrukce ionizačních komor (souosé a paralelní desková, tzv. PPIC), převzato z [9].

Podle tlaku plynu v komoře rozdělujeme komory na nízkotlaké a vysokotlaké<sup>8</sup>. Nízkotlaké komory pracují s hodnotami shodnými s tlakem atmosférickým, ale plynová náplň je od okolního prostředí hermeticky oddělena. Vysokotlaké komory mají přetlak až 1 MPa, což zvyšuje citlivost zařízení, ale zároveň i nároky na jejich konstrukci. Z důvodu útlumu materiálem stěn mohou detekovat pouze záření  $\gamma$ .

Působením ionizujícího záření jsou z elektronových obalů atomů plynu vyraženy elektrony (počet protonů je tak větší než počet elektronů, převládají kladné náboje) a vznikají kladné ionty. Kladně nabitě ionty jsou přitahovány katodou, záporně nabitě ionty naopak anodou. V původně nevodivém prostředí komory se uplatní jev iontové vodivosti, která je přímo úměrná intenzitě nabitých částic a velikosti výstupního elektrického proudu. Fyzikální princip popisuje obr. 4:



Obr. 4: Princip funkce ionizační komory, převzato z [10].

<sup>6</sup> Zvláštním případem jsou otevřené komory, kde funkci plynu vykonává vzduch.

<sup>7</sup> Nejčastěji tvoří katodu stěna komory a anodu tyčová elektroda.

<sup>8</sup> Zvláštním typem jsou komory ventilované, které obsahují okruh zabraňující pronikání vlhkosti.



## 2.4 Studnové detektory

Někdy označované jako *dávkové kalibrátory*<sup>9</sup>. Jedná se o detektory válcového typu, do jejichž středu se vkládá měřený vzorek v lahvičce či injekční stříkačce. Vnitřní povrch válce tvoří ionizační komora, záření je tedy registrováno ve  $4\pi$ , z geometrického hlediska lze teoreticky zachytávat 100% záření, v praxi je přesnost menší (záření může unikat pouze horním otvorem studny, i toto lze vhodným konstrukčním řešením eliminovat). Jelikož však záření  $\gamma$  nelze nikdy zcela absorbovat (k tomu by musela být velikost komory nekonečně velká), nelze aktivitu měřit absolutně, ale srovnáním s aktivitou zářiče o známé aktivitě.

Princip metody spočívá v měření střední časové hodnoty počtu interakcí (vzniku iontových párů) za jednotku času v konečném objemu měřicí komory [7]. Integroálně lze dovodit (6):

$$i_k = e \iiint_{xyz} n(x, y, z) dx dy dz$$

kde  $i_k$  je výstupní proud,  $n(x, y, z)$  je počet nábojů vzniklých ionizací a  $x, y, z$  jsou prostorové dimenze komory. Tento vztah však platí pouze pro konstantní ozáření komory a nereflexuje vlivy difúze a saturace. Obdobně lze matematicky definovat i ztráty vlivem rekombinace, které jsou sice v pracovní oblasti ionizační komory zanedbatelné, ale pro velmi přesná měření se uplatní.

Princip vyhodnocení je založen na měření proudu, který je přímo úměrný dopadajícímu záření (obr. 2, oblast 2). Jelikož se jedná o proudy řádově  $10^{-12} A$  a menší (nejcitlivější přístroje pracují s proudy  $10^{-15} A$ ), je proud měřen nepřímou jako úbytek napětí na velkém odporu  $10^{14} \Omega$  RC článku. Parametry tohoto článku (zejména jeho časová konstanta  $\tau$ ) určují limitní parametry měřícího zařízení. Dále se vzniklé napětí měří elektrometrem (voltmetrem tvořeným diferenciálním zesilovačem s FET a se vstupním odporem  $10^{16} \Omega$ ). Z důvodu měření velmi malých proudů je nutná důsledná časová i teplotní stabilita celého měřícího systému.

Výhodou studnových detektorů je lineární závislost výstupního proudu při velkých aktivitách záření a tedy možnost měřit velmi vysoké dávky (řádově stovky  $TBq$ ) a především velmi široký dynamický rozsah (několik řádů). Naopak při měření malých aktivit vznikají chyby způsobené statickými fluktuacemi v počtu elektronů a iontů. Měření se dají považovat za spolehlivá při dávkách větších než  $100 kBq$ , měření jednotek  $kBq$  je možné při současném prodloužení standardního měřícího času (řádově sekundy) na jednotky minut. Při požadavku na měření ještě menších aktivit již nelze studnových detektorů na bázi ionizační komory použít [6].

V tuzemsku jsou rozšířené měřiče aplikované aktivity Curiementor německého výrobce *PTW Freiburg* (dodavatel *CANBERRA-PACKARD, s.r.o.*), měřiče řady VDC firmy *COMECER Netherlands* (dříve *Veenstra Instruments*), dodavatel pro ČR *Ing. Petr Šimeček* a *BQM* (dodavatel *Empos spol. s r.o.*). V zahraničí jsou používány i měřiče firem *Capintec* (řada CRC) a *Biodex* (přístroje Atomlab).

---

<sup>9</sup> Z ang. Dose calibrator.

### 3 Přístroj Curiementor

Přístroj pro měření aplikované aktivity Curiementor 3, resp. 4 je výrobek německé firmy *PTW Freiburg*<sup>10</sup> [11][12]. Jedná se o izotopový kalibrátor sloužící ke stanovení aktivity radionuklidů běžně užívaných v nukleární medicíně. Skládá se z ionizační komory a řídicí jednotky. Komora je s vyhodnocovací jednotkou propojena metalicky. Přístroj Curiementor [13][14][15] je aktuálně k dispozici ve verzi 3 (5 předvolených radionuklidů) a 4 (30 předvolených radionuklidů)<sup>11 12</sup>.



Obr. 5: Přístroj Curiementor, převzato z [16].

Měřicí rozsah přístroje vztažený k referenčnímu izotopu  $^{137}\text{Cs}$  je od 0,1 MBq do 195 GBq s rozlišením 0,001 MBq. Udávaná linearita je menší jak 2%, míra reprodukovatelnosti pod 5%, resp. 2% u Curiementoru 4 [11].

Ionizační komora je studnového typu o vnějším rozměru 329 x 137,5 mm, plněná argonem při tlaku 1 MPa a provozním napětí 400 V. Měřicí komoru tvoří akrylátový vodící válec o vnitřním průměru 12 mm, výšce 35 mm. Hmotnost komory včetně stínění je cca 8,3 kg. Vně válce se přikládá stínění z olověných bloků

Přístroj se vyznačuje intuitivní obsluhou, k ovládání slouží tlačítka fóliové klávesnice umístěná na vrchní straně přístroje. Některá z tlačítek jsou pouze jednoúčelová (přepínání mezi farmaky, *VIAL* pro výběr stříkačka/láhev, resp. *FL/SY*, *BACKGROUND* pro měření pozadí, *PRINT*, *START*), jiná slouží k pohybu, potvrzování a odchod z menu. Aktuální zvolené údaje a změřené hodnoty se zobrazují na LCD display. Volitelně lze k přístroji připojit přes konektor sériového

<sup>10</sup> Zkratka pro Physikalisch-Technische Werkstätten.

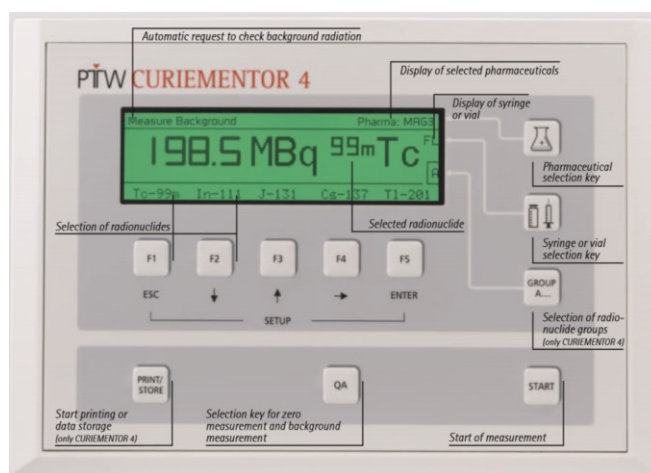
<sup>11</sup> Curiementor verze 3 má pro každý radionuklid vlastní HW tlačítko, verze 4 využívá stejný počet tlačítek, avšak v šesti skupinách (značených A-F).

<sup>12</sup> V ČR je stále rozšířený i starší model Curiementor 2.

rozhraní PC s příslušným SW (a pak v závislosti na použitém SW ovládat přístroj z PC) a tiskárnu (kap. 3.2).

Curiementor je přednastaven pro měření nejběžnějších radionuklidů, konkrétně lze uživatelsky přepínat mezi měřeními  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{51}\text{Cr}$  a  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , do paměti lze však vložit i další radionuklidy. Dále lze uživatelsky definovat tzv. *faktory izotopů*, tzn. jejich korekční faktory pro různé podmínky měření. Údaje o aktuálně zvoleném izotopu a nastavených faktorech jsou zobrazeny na display spolu s výslednou hodnotou měření.

Přístroj Curiementor je dle MEDDEV a zákona č. 268/2014 Sb. klasifikován do třídy rizika IIb. Mimo povinnosti provádění pravidelných BTK je však i stanoveným měřidlem, spadá tedy i do dílky zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii a musí být v pravidelných intervalech ověřován (kap. 8).



Obr. 6: Ovládací panel Curiementor 4, převzato z [11].

Princip měření aktivity je založen na převodu aktivity radionuklidu na elektrický proud. Tento převod probíhá dle vztahu (7):

$$A = I \cdot k$$

kde  $A$  je aktivita radionuklidu a  $k$  součin všech korekčních faktorů. Přístroj Curiementor zohledňuje celkem čtyři druhy korekčních faktorů, po přepsání vztahu (7) platí (8):

$$A = I \cdot k_Q \cdot k_{w/o\ Pb} \cdot k_{Syringe} \cdot k_{misc}$$

kde: faktor  $k_Q$ , zohledňující odchylku od referenčního izotopu  $^{137}\text{Cs}$ ,

faktor  $k_{w/o\ Pb}$ , zohledňující měření bez stínících bloků (implicitní hodnota je 1,000),

faktor  $k_{Syringe}$ , zohledňující měření s injekční stříkačkou (implicitní hodnota je 1,000),

faktor  $k_{misc}$ , korekce všech ostatních vlivů (implicitní hodnota je 1,000). Tento činitel je pro každý izotop jiný, zohledňuje vliv stínění a byl stanoven empiricky.

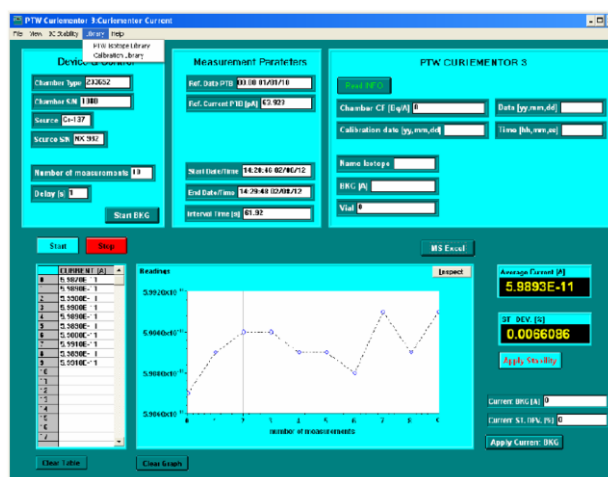
Přístroj umožňuje měřené jednotky prezentovat v  $\text{Bq}$ ,  $\text{Ci}$  (aktivita) a  $\text{pA}$  (elektrický proud).

Jelikož měřící zařízení pracuje s velmi malými proudy (řádově  $10^{-12}\text{ A}$ ), je pro získání validních hodnot měření nutné zabezpečit teplotní ustálení (nahřátí komory) v době cca 5 minut po zapnutí nebo 15 sekund po resetu přístroje. Z výše uvedeného důvodu je rovněž nutný i časový

rozestup mezi měřeními. V případě provádění testů je vhodné prvních cca 5 změřených hodnot z výběrového souboru odstranit (kap. 6).

### 3.1 SW Curiementor

K přístrojům Curiementor poskytuje výrobce *PTW Freiburg* volně rozsáhlou dokumentaci s detailním popisem komunikačního protokolu [17]. Vznikla tak řada tuzemských i zahraničních SW, které pomocí implementovaného interface dokáží do přístroje Curiementor vstupovat a pomocí příkazů (telegramů) ovládat některé jeho funkce, resp. dožadovat se pomocí dotazů validních odpovědí. Příklad výčtu poskytovaných hodnot uvádí tab. 2:



Obr. 7: Náhled SW pro komunikaci s přístrojem Curiementor, převzato z [18].

Tab. 2: Data SW Curiementor.

<i>nn</i>	<i>delay</i>	<i>metoda</i>	<i>nadobaChceked</i>
<i>flg</i>	<i>pocetMereni</i>	<i>prumer1</i>	<i>stineniChecked</i>
<i>merVal</i>	<i>datum</i>	<i>sko1</i>	<i>user</i>
<i>activita</i>	<i>time</i>	<i>prumer2</i>	<i>companv</i>
<i>odch1</i>	<i>davCount</i>	<i>sko2</i>	<i>vyrCislo</i>
<i>odchP1</i>	<i>yymmdd</i>	<i>min1</i>	<i>ver</i>
<i>odch2</i>	<i>patient</i>	<i>max1</i>	<i>DevName</i>
<i>odchP2</i>	<i>patID</i>	<i>min2</i>	<i>DevVersion</i>
<i>tt</i>	<i>isotopID</i>	<i>max2</i>	<i>DevSerialNo</i>
<i>kSigma</i>	<i>isotopName</i>	<i>nnBezExtremu</i>	<i>...</i>

**Curiementor**

Soubor Nastavení Návod

Zpoždění [s]: 5 Čítač ID: 2 Tisk štítku(1) Tisk štítku(2) Tisk štítku(3) Tisk štítku(4)

Info **Měření proběhlo, můžete data uložit.** 2,932 [MBq]

Pacient  
Jméno: ID číslo: 2301014  
Metodika/Výšetření: etalon Objem[mil]:

Měření  
Start měření Stop Isotop ID: 28 Com: COM4 0 Reset

Status  
Přístroj: Curiementor 4 Verze: 2.20 Sériové číslo: 000076 Kod chyby:  
Jednotky Ci: 0 Status: RUN Stat. kal.: 1 00000  
PTW Curiementor 4 -

Typ nádoby  
☐ Stříkačka ☒ Sklo  
Stínění  
☐ Bez stínění ☒ Pb stínění

Isotop  
Isotop: Cs-137 Pol. rozpadu: 11019.000 [dnů] Chamber Factor: 2,0680E+017 Počet měření: 1  
kQ: 1 k (W/O Pb): 1 k (Syringe): 1 k (misc): 0,882 Datum kal.: 24.10.2018

Statistika výsledků  
Průměr [Bq]: 2,93185E+06 SKO: 1725 Min: 2,929E+06 Max: 2,935E+06 Hranice (k\*SKO): 1,1  
Průměr bez extrémů [Bq]: 2,93157E+06 SKO: 1089 Min: 2,93E+06 Max: 2,933E+06 Počet bez ex.: 14

Měř.	Přenesená hodnota	Aktivita [Bq]	Odchyka1 [Bq]	Odchyka1 [%]	Odchyka2 [Bq]	Odchyka2 [%]	Čas měření [s]	Isotop
1	2934000	2934000	2150	0.0733	2429	0.0828	0.0	Cs-137
2	2933000	2933000	1150	0.0392	1429	0.0487	4.4	Cs-137
3	2934000	2934000	2150	0.0733	2429	0.0828	8.9	Cs-137
4	2933000	2933000	1150	0.0392	1429	0.0487	13.3	Cs-137
5	2932000	2932000	150	0.00512	428.6	0.0146	17.8	Cs-137
6	2932000	2932000	150	0.00512	428.6	0.0146	22.2	Cs-137
7	2935000	2935000	3150	0.107	3429	0.117	26.6	Cs-137
8	2932000	2932000	150	0.00512	428.6	0.0146	31.1	Cs-137
9	2930000	2930000	-1850	-0.0631	-1571	-0.0536	35.5	Cs-137
10	2932000	2932000	150	0.00512	428.6	0.0146	39.9	Cs-137
11	2934000	2934000	2150	0.0733	2429	0.0828	44.4	Cs-137
12	2930000	2930000	-1850	-0.0631	-1571	-0.0536	48.9	Cs-137
13	2929000	2929000	-2850	-0.0972	-2571	-0.0877	53.3	Cs-137
14	2931000	2931000	-850	-0.029	-571.4	-0.0195	57.8	Cs-137
15	2931000	2931000	-850	-0.029	-571.4	-0.0195	62.2	Cs-137
16	2929000	2929000	-2850	-0.0972	-2571	-0.0877	66.7	Cs-137
17	2930000	2930000	-1850	-0.0631	-1571	-0.0536	71.1	Cs-137
18	2931000	2931000	-850	-0.029	-571.4	-0.0195	75.5	Cs-137
19	2933000	2933000	1150	0.0392	1429	0.0487	80.0	Cs-137
20	2932000	2932000	150	0.00512	428.6	0.0146	84.4	Cs-137

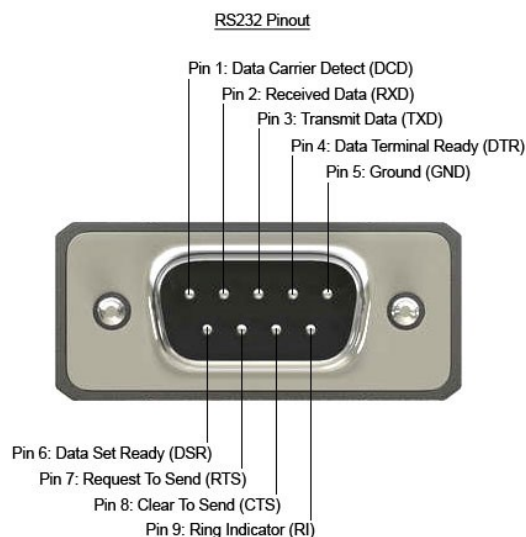
Obr. 8: Náhled SW CuriementorControl, výrobce VKlab s.r.o.

Nevýhodami těchto dodávaných SW jsou jejich zpravidla přílišná složitost, redundance měřených parametrů, v některých případech zobrazení číselných výsledků v matematickém formátu čísla a především nutnost fyzického propojení s počítačem. Pro účely každodenního používání je SW poněkud robustní.

### 3.2 Komunikační rozhraní

Pro účely externí komunikace je přístroj vybaven rozhraním RS-232 (sériovým portem). Fyzicky je užito 9 pinového konektoru D-Sub<sup>13</sup> neboli DE-9F (female, zásuvka). Zapojení jednotlivých signálových pinů odpovídá standardním zvyklostem a popisují jej následující obrázek a tabulka:

<sup>13</sup> Neboli D-Subminiature, někdy nesprávně značen jako Sub-D, Cannon nebo Canon.



Obr. 9: Zapojení RS-232, převzato z [19].

Tab. 3: Zapojení pinů sériového rozhraní, převzato z [17].

CURIEMENTOR 3/4 9 pin				IBM 25 pin		IBM 9 pin	
Pin	Signal	type		Pin	Pin	Signal	type
1	no connection		↔	1	1	shield	
2	TxD	out	→	3	2	RxD	in
3	RxD	in	←	2	3	TxD	out
4	1)		←	5	4	DTR	out
5	SGND 2)		↔	4	5	SGND	
6	1)		→	6	6	DSR	in
7	CTS 3)	in	←	20	7	RTS	out
8	+ 5 V 4)	out	→	7	8	CTS	in
9	no connection						

Jedná se o bezkolizní plně duplexní komunikaci. Přenosová rychlost je 9600 *Bd*, délka slova je 8 bitů, kontrola paritním bitem se nepoužívá.

Dalším výstupem je konektor pro připojení tiskárny. Fyzicky se jedná opět o rozhraní RS-232, realizované však konektorem DE-9M (inverzním ke konektoru předešlému). Připojená termotiskárna tiskne na samolepící štítky o rozměru 57 x 32 mm údaje o datu a čase měření, hodnotách referenčních zdrojů, dle kterých byl přístroj metrologicky ověřen a aktuální změřenou aktivitu spolu s vypočtenou odchylkou. Data z tohoto štítku jsou zaznamenávána do pacientské dokumentace.

Stability Check Report - 25/04/2019 06:32:07	
Calibrator:	PTW Curiementor4
Reference Source:	Cs137 S/N: CDRB1548
Activity: 3.170 MBq at 14/10/2011 15:29:54	
2.665 MBq at 25/04/2019 06:32:05	
Measured Values:	Operator: CPCZ
Activity: 2.574 MBq at 25/04/2019 06:32:05	
Deviation: -3.42 %	

Obr. 10: Termoštítek.

Obě výstupní rozhraní (sériové i pro tiskárnu) jsou od vlastního přístroje elektricky izolovány.



### 3.3 Komunikační protokol

Pro komunikaci přes sériové rozhraní je definován komunikační protokol. Podrobný popis komunikačního protokolu je uveden v [17]. Komunikace probíhá na nejnižší úrovni pomocí ASCII řetězců, protokol obsahuje definované příkazy, tzv. telegramy, po jejichž odeslání do přístroje následuje odpověď (response). Každý telegram je zakončen znaky *CR* (carriage return, návrat vozíku, hodnota 0Dh) a *LF* (line feed, hodnota 0Ah). *Escape* (1Bh) bez *CR* a *LF* je speciální funkce pro nastavení nuly. Pro veškerou komunikaci platí zásada, že za příkazem odeslaným do Curiementoru musí následovat odpověď (resp. chybové hlášení), až poté je možno zaslat nový příkaz.

Tyto telegramy se dělí na *informační* (information), *utility*, *měřicí* (measurement), *datové* (data) a *kalibrační* (calibration).

Struktura telegramu obsahuje vždy klíčové slovo (příkaz), za nímž následuje jeden nebo více parametrů. Jednotlivé parametry jsou odděleny středníky, přičemž maximální délka parametru nesmí překročit 15 znaků.

Samostatnou skupinu zpráv tvoří *chybová hlášení* (Error Codes), viz kap. 3.3.2.

#### 3.3.1 Telegramy

Ke komunikaci SW s řídicí jednotkou Curiementoru slouží celkem 40 příkazů – telegramů. Telegram je tvořen jedním až třemi znaky a volitelně i parametry. Celý seznam příkazů včetně syntaxe a parametrů je k dispozici v [17]. Pro účely praktické části této práce jsou využity následující příkazy (telegramy):

Příkaz: **BKG Start a background measurement** (měřicí telegram)

Příkaz ke změření hodnoty pozadí. Po jeho odeslání přístroj po dobu 30 sekund provádí sekvenci měření hodnot pozadí a vrátí její střední hodnotu. Timeout příkazu je 31 sekund.

Odpověď: *BKG*

Možná chybová hlášení: E01, E03, E05, E11, E12.

Příkaz: **DBG Read background value** (měřicí telegram)

Přečte poslední hodnotu realizovanou příkazem BKG.

Odpověď: *DBG;±m.mmmE±ee;yyyy;mm;dd;hh;mm;ss;bbbb*

kde: *±m.mmm* mantisa vědeckého zápisu měřené hodnoty (vždy šest znaků),  
*E±ee* exponent vědeckého zápisu měřené hodnoty (vždy dvoumístné číslo),  
*yyyy;mm;dd* datum měření ve formátu rrrr;mm;dd,  
*hh;mm;ss* čas měření ve formátu hh;mm;ss,  
*bbbb* kontrolní hodnota.

Možná chybová hlášení: E01, E03.

Příkaz: **DTD Read date of real time clock** (utility telegram)

Příkaz vrátí hodnotu aktuálního data nastavenou v přístroji.

Odpověď: *DTD;yyyy;mm;dd*

Možná chybová hlášení: E01, E03.

Příkaz: **DTT Read time of real time clock** (utility telegram)

Příkaz vrátí hodnotu aktuálního času nastavenou v přístroji.

Odpověď: *DTT;hh;mm;ss*

Možná chybová hlášení: E01, E03.

Příkaz: **MV Read measured value** (datový telegram)

Příkaz ke čtení měřené hodnoty.

Odpověď: *MV;FL;V;eeee;±m.mmmE±ee;a;bbbb*

kde: *FL* je dvouciferné číslo, které po převodu na hexadecimální tvar indikuje číslo chyby měření,  
*V* je jednociferné číslo, které po převodu na hexadecimální tvar indikuje příznak platného měření,  
*eeee*, při korektním měření hodnota 00000,  
*±m.mmm* mantisa vědeckého zápisu měřené hodnoty (vždy šest znaků),  
*E±ee* exponent vědeckého zápisu měřené hodnoty (vždy dvoumístné číslo),  
*a* značí přesnost měření, jednociferná hodnota (0 = chyba měření menší než 5%, 2 = chyba měření větší než 5%,  
*bbbb* je kontrolní blok číslic.

Možná chybová hlášení: E01, E03.

Příkaz: **NUL Start a zero adjustment** (měřicí telegram)

Příkaz k nastavení nuly. Timeout příkazu je 52 sekund.

Odpověď: *NUL*

Možná chybová hlášení: E01, E03, E05, E11, E12.

Příkaz: **S Read device status** (informační telegram)

Slouží ke zjištění aktuálního statusu zařízení.

Odpověď: *S;sss*

kde *sss* může nabývat hodnot: ERR (chyba), MEN (režim nastavování), RUN (režim měření).

Možná chybová hlášení: E01.



Příkaz: **SER Read serial number of device** (informační telegram)

Vrátí hodnotu výrobního čísla přístroje (vždy šesticiferná hodnota začínající nulou).

Odpověď: *SER;ssssss*

Možná chybová hlášení: E01 a E03.

Příkaz: **STA Start a measurement** (měřicí telegram)

Odpověď: *STA*

Možná chybová hlášení: E01 a E03.

Timeout všech příkazů vyjma BKG a NUL je max. 2 sekundy.

Měřicí telegram SVN (Read number of stored measurement results) vrátí číslo počtu uložených měření v intervalu 0-140, funkce je dostupná pro Curiementor od verze 4.

### 3.3.2 Chybová hlášení

Při definovaných událostech vrací přístroj chybová hlášení (telegramy) ve formě znaku *E* a kódu chyby. Těchto událostí může nastat celkem osm těmito parametry:

E01 – neznámý příkaz nebo neplatný parametr

E02 – příkaz v tomto kontextu není povolen

E03 – příkaz v tuto chvíli není povolen (přístroj je v režimu MENU nebo chybovém stavu)

E05 – nulování není možné

E06 – chyba při zápisu do paměti EEPROM

E08 – parametr mimo definovaný rozsah

E11 – neuplynul stabilizační čas

E12 – operace přerušena klávesou *ESC*

## 4 Praktická část

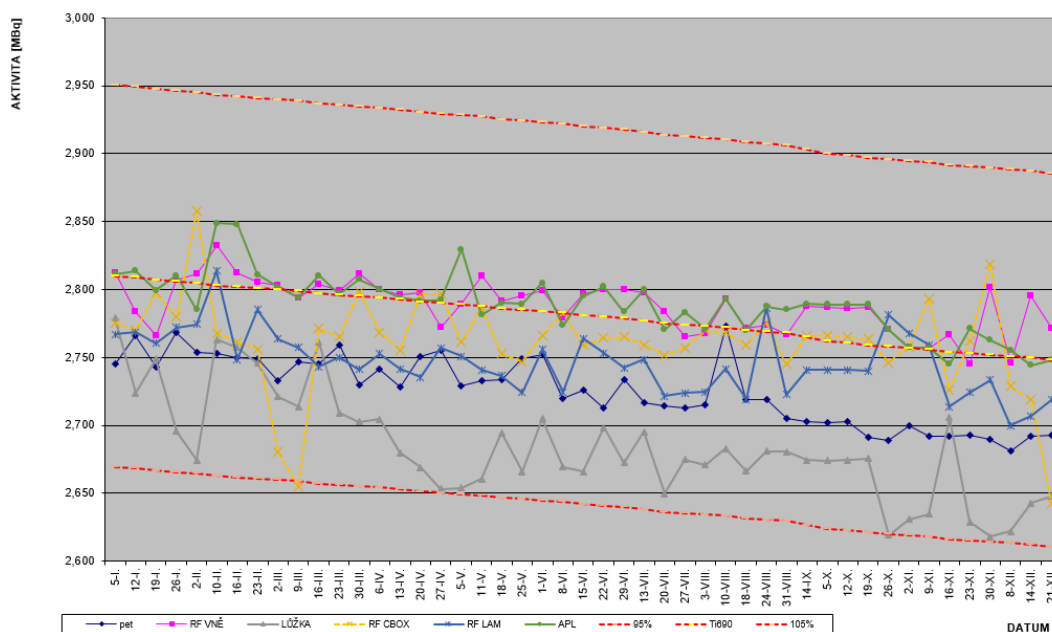
ONM Fakultní nemocnice Hradec Králové provozuje celkem šest přístrojů Curriementor 3, resp. Curiementor 4 (modely *T12001*, *T12002* a *T12004*), dalším přístrojem disponuje Klinika onkologie a radioterapie. Fyzicky jsou přístroje rozmístěny v rámci jedné budovy, avšak v různých podlažích. Všechny přístroje jsou vybaveny firmware 2.1 a vyšším. Při jejich používání je z legislativního hlediska i pro kontrolu kvality, vycházející z [20][21][22] nutno v pravidelných intervalech sledovat přesnost<sup>14</sup> měření, k čemuž slouží testy kvality.

### 4.1 Motivace

V současné době probíhá rutinní kontrola (ZPS) tak, že pověřený pracovník ONM (implicitně fyzik) každý pracovní den fyzicky změří u každého z Curiementorů 20 hodnot (s prodlevou mezi měřeními cca 15 s)<sup>15</sup> a tyto hodnoty písemně zaznamená do předtištěného protokolu. Po získání všech hodnot (tedy 120 údajů) tyto přepíše do tabulkového procesoru (implicitně MS Excel). Tato kontrola, která je ZPS dle [23][24], by měla být prováděna minimálně jednou denně, resp. před každým podáním léčiva pacientovi [25]. Záznamy z takto provedených kontrol se pak musí uchovávat nejméně po dobu jednoho roku.

Tab. 4: Změřené hodnoty ZPS.

Test měřičů aktivity 4.1.2018 Cs137 - Tl690											
	1	2	3	...	19	20	průměr	sm	rozpad	průměr/rozpad	var. koef.
T12004-0076 (pet)							2,674		2,746	97,4%	
T12004-0077 (RF)	2,797	2,798	2,796	...	2,798	2,797	2,797	0,13%	2,746	101,8%	0,05%
T12004-0078 (lůžka)	2,628	2,628	2,628	...	2,631	2,63	2,627	0,18%	2,746	95,7%	0,07%
T12004-205 (RFTcbox)	2,770	2,768	2,700	...	2,770	2,771	2,766	1,52%	2,746	100,7%	0,55%
T12004-206 (RF-lam)	2,688	2,690	2,690	...	2,690	2,691	2,691	0,11%	2,746	98,0%	0,04%
T12004-0261 (apl)	2,737	2,738	2,740	...	2,741	2,740	2,739	0,16%	2,746	99,8%	0,06%



Obr.11: Kalibrační křivka ZPS.

<sup>14</sup> Měřena je skutečně přesnost, tj. konstantnost stability v čase, nikoliv správnost (ta je navázána na etalon).

<sup>15</sup> Tato doba slouží k ustálení dějů uvnitř ionizační komory.

Další zkouškou, která je odborným personálem ONM prováděna, je zkouška dlouhodobé stability, kdy se data změřená v rámci jednotlivých ZPS pomocí vypočteného variačního koeficientu  $v_x$  analyzují v dlouhodobějším časovém horizontu a definovaným postupem se vykreslí kalibrační křivky. Tyto křivky musí ležet uvnitř předem definovaného tolerančního pole (obr. 11).

Zkouška linearit se provádí v ročním intervalu a jejím cílem je ověření správného převodu měřící soustavy. Jak je popsáno v kap. 2, princip měření je založen na převodu aktivity na elektrický proud. Tato závislost však není exaktně lineární, zjednodušeně lze prohlásit, že (9):

$$I \approx A.k$$

kde:  $I$  je výsledný elektrický proud ( $pA$ ),

$A$  je měřená aktivita ( $MBq$ ),

$k$  je kalibrační koeficient.

Kalibrační koeficient v sobě zahrnuje celou škálu faktorů. Cílem testu je tedy ověřit shodu měření s předem známou aktivitou referenčního izotopu  $^{137}\text{Cs}$ . Tuto zkoušku dodavatelsky zajišťuje ČMI.

Dále je nutno každý den měřit hodnotu pozadí (background). Změření této hodnoty zajišťuje nejen eliminaci hrubých chyb následného měření, ale dává i informaci o možné kontaminaci studny detektoru.

Je zřejmé, že ruční postup měření a zpracování výše zmíněných testů je zdoluhavý a potencionálně náchylný k zavedení hrubých chyb měření (Tab. 5). Tyto chyby mohou vzniknout chybným odečtením z displaye, chybným zápisem do formuláře (resp. jeho následným přečtením údaje) nebo chybou při vkládání do tabulkového editoru.

Tab. 5: Chybovost při měření ZPS.

2,694	2,695	2,694	2,694	2,693	2,693	2,694	2,694	2,693	2,696	2,694	2,695	2,695	2,695	2,694	2,697	2,694	2,694	2,695	2,696
2,568	2,566	2,568	2,568	2,567	2,568	2,569	2,568	2,568	2,568	2,566	2,568	2,569	2,567	2,567	2,567	2,567	2,568	2,567	2,566
2,687	2,688	2,688	2,689	2,690	2,690	2,688	2,688	2,689	2,690	2,690	2,688	2,689	2,689	2,689	2,688	2,689	2,688	2,689	2,688
2,660	2,662	2,662	2,660	2,664	2,661	2,662	2,663	2,664	2,662	2,661	2,664	2,662	2,663	2,662	2,661	2,665	2,663	2,663	2,661
2,693	2,689	2,688	2,690	2,693	2,694	2,693	2,690	2,693	2,692	2,690	2,692	2,695	2,693	2,694	2,693	2,692	2,693	2,692	2,693
2,814	2,814	2,815	2,816	2,817	2,817	2,815	2,818	2,818	2,817	2,817	2,814	2,817	2,817	2,817	2,816	2,816	2,817	2,816	2,817

Důležitým aspektem správného měření je seřízení nuly, které je kompenzací k nelineární charakteristice měření. Toto seřízení je nutné provést vždy, když je výsledná hodnota měření extrémně malá (menší než 20ti násobek rozlišení) nebo dokonce záporná. Pro tento případ přístroj indikuje hlášení *Zero Electrometer*. Nula elektrometru by měla být rovněž nastavena při každé změně okolních podmínek (např. změna okolní teploty) a také v pravidelných měsíčních intervalech [13].

Chyby měření mohou vzniknout i dalšími mechanismy: použitím neověřeného přístroje, chybně zvoleným měřícím rozsahem (jiným navoleným izotopem), špatně zavedeným korekčním parametrem nebo záměnami nastaveného měření se stíněním či stříkačkou. Problematiku přesnosti měření řeší i zahraniční studie [26].

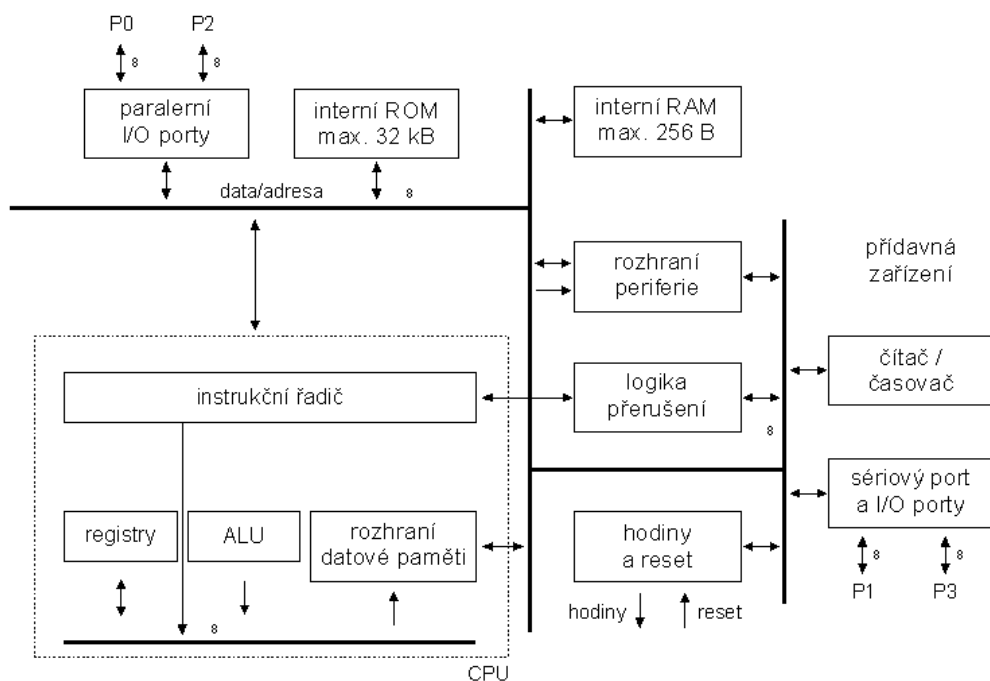
## 4.2 Technologie automatizace

Cílem praktické části této práce je zjednodušit, zpřesnit a zrychlit rutinní činnosti popsané v kap. 4.1. Jelikož data z přístroje Curiementor jsou přístupná pouze přes sériové rozhraní RS-232 a prezentace dat je požadována v tabulkovém procesoru, je k efektivní komunikaci a vyčítání dat nutno užít kombinace HW a SW řešení [27].

Je zřejmé, že HW část takto náročné úlohy nelze realizovat pouze za pomoci logických integrovaných obvodů, ale je vhodné použít programovatelných součástek a vytvořit tzv. *vestavěný (embedded) systém*. Jeho základem je vždy mikrokontrolér<sup>16</sup> [28]. Struktura mikrokontroléru integruje v jednom pouzdře vše potřebné pro jeho autonomní funkci – procesor, operační paměť pro běh programu RAM, paměť programu typu ROM, EPROM, EEPROM, dnes nejčastěji FLASH, RC oscilátor nebo krystal k určení hodinového taktu a I/O rozhraní pro komunikaci s okolím. Rozhraní (porty) mohou být analogové či digitální, další dělení může být na sériové/paralelní, porty sběrnic I<sup>2</sup>C, PWM, Ethernetu, CAN-BUS a další. Mikrokontrolér může obsahovat i další podpůrné obvody, zejména řadiče (přerušení, klávesnice), čítače a časovače (obr. 12).

Mikrokontroléry jsou dnes běžnou součástí průmyslových aplikací, automobilů i spotřební elektroniky, kde mohou ovládat jednoduché děje i složité procesy. Pro implementaci ve velkých výrobních sériích je ekonomicky výhodná zakázková výroba těchto obvodů. Naopak pro účely prototypování a malosériovou výrobu je pro uživatele k dispozici na současném trhu k dispozici široká škála možností.

Éru mikrokontrolérů dostupných i běžným uživatelům a vývojářům nastavila firma Intel svými mikropočítači řady 80xx (nejznámější je 8051). Tento dnes již archaický mikrokontrolér byl dodáván v několika verzích celou řadou výrobců.



Obr. 12: Blokové schéma mikrokontroléru, převzato z [28].

<sup>16</sup> Ang. microcontoller, zkr. MCU nebo  $\mu\text{C}$ , česky rovněž jednočipový počítač.

Dalšími rozšířenými mikrokontroléry jsou řada PIC od společnosti Microchip, AVR od firmy Atmel, firmy Motorola, Philips a další. Zásadní nevýhodou prvních mikrokontrolérů bylo užití paměti ROM pro uložení programu. K mazání paměti (elektricky, UV světlem) a opětovnému programování bylo nutno vlastnit patřičný programovací přípravek.

Nejprve za didaktickým účelem a poté i k prototypování se na přelomu tisíciletí začínají na trhu objevovat první ucelené vývojové platformy. Jejich rozvoji napomohlo snížení ceny pamětí FLASH, rozvoj Internetu a open-source přístup. Nejrozšířenější platformou je Arduino, případně jeho klony Freeduino, Rainbowduino, Seeeduino a další. Jen oficiálních Arduino desek je k dispozici několik, lišících se výkonem, počtem vstupů, velikostí pamětí, typem USB rozhraní atd. Popisu konkrétního Arduino UNO se věnuje kap. 4.4. Mezi další rozšířené vývojové kity lze řadit desky s procesory STM8, resp. STM 32, Tinkerforge a projekt .NET Gadgeteer.

Evolučně vyspělejšími zařízeními jsou minipočítače. Na rozdíl od mikrokontrolérů mají operační systém a lze k nim přes standardní porty (USB, HDMI, Ethernet) připojit běžné periferie. Nevyžadují od svého uživatele HW znalosti, mají však vyšší energetické nároky, jsou dražší a z pohledu vestavěných platform jsou zbytečně robustní. Nejznámějším představitelem této kategorie je Raspberry Pi, pro speciální aplikace vyhovují i méně rozšířené Banana Pi, Odroid a další.

Obvodově lze tedy datalogger realizovat celou řadou HW produktů. Z důvodu optimalizace rozměrových, ekonomických i funkčních parametrů byl pro řešení zvolen modulární systém na vývojové platformě Arduino. Na jeho bázi jsou dostupné všechny potřebné moduly jako mikroprocesor, externí SRAM paměť, moduly pro bezdrátovou konektivitu, převodník napěťových úrovní, modul napájení a managementu nabíjení, zobrazovací jednotky, kapacitní tlačítka a mnohé další.

### 4.3 Možnosti komunikace

Komunikační protokoly využitelné pro účely této práce lze rozdělit do dvou skupin. Komunikace přístroje Curiementor s vnějším prostředím bude vždy drátová, neboť přístroj jinou konektivitu než implementovaným rozhraním RS-232 neumožňuje (kap 3.2). Následná komunikace převodníku či dataloggeru s vyhodnocovacím počítačem může být drátová (jak tomu je v řešení kap 4.4), tak i bezdrátová (viz kap 4.5) a to s různými parametry. Třetí možností je bezdrátový přenos dat pomocí paměťového média (avšak zde se nejedná o komunikaci v reálném čase).

Nejefektivnější metalickou komunikací propojení dvou zařízení představuje sériová komunikace [29][30]. Ta na rozdíl od komunikace paralelní vystačí s menším počtem vodičů, neboť data jsou přenášena nikoliv současně po  $n$  vodičích, ale v přesně definovaném sledu za sebou. Tím se sice sníží rychlost přenosu, ale převáží jiné fyzikální výhody. Proto se až na některé výjimky (počítačové a průmyslové sběrnice) zpravidla paralelní komunikace neužívá.<sup>17</sup>

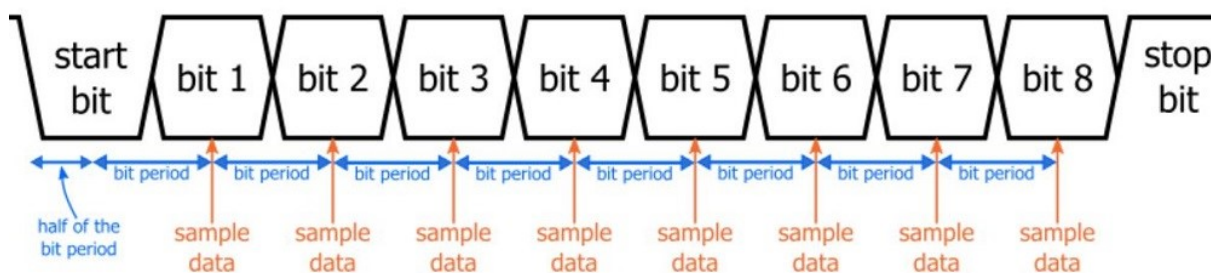
Sériová komunikace (USART) může být ve svém principu synchronní či asynchronní (UART). Synchronní komunikace vyžaduje synchronizační vodič - přenos signálu hodin  $CLK$ , zatímco asynchronní dává informaci o poloze datových bitů pomocí  $START$  a  $STOP$  bitu. Komunikace probíhá na fyzické vrstvě modelu  $ISO/OSI$ , u užitečného signálu  $RxD$  a  $TxD$  je užito negativní logiky, tzn. klidová úroveň signálu je logická 1<sup>18</sup> (u standardu RS-232 z důvodu větší odolnosti proti rušení

---

<sup>17</sup> Paralelní komunikace se však v současnosti užívá v radiovém přenosu.

<sup>18</sup> Někdy označována jako marking state.

v rozmezí  $-15\text{ V}$  až  $15\text{ V}$  při maximální vzdálenosti vysílače a přijímače  $15\text{ m}$ ), zatímco logická  $0^{19}$  značí START bit. Následuje sekvence bitů od nejméně významného (*LSB*) po nejvíce významný (*MSB*). Následuje *STOP* bit, který má úroveň log. 1 (obr. 13). Naopak řídicí signály *CTS* a *RTS* mají logiku pozitivní. V některých případech se pro kontrolu správnosti přenosu používá tzv. *paritní bit*. Kontrola paritou (sudou či lichou) je jednoduchým testem ke kontrole správnosti přenosu, kdy se k datovému slovu přidá bit s informací o počtu bitů s logickou úrovní 1. Možnost zahájení vysílání a potvrzení příjmu dat zabezpečuje handshaking. Ten může být zajišťován hardwarově či softwarově (na úrovni komunikačního protokolu).



Obr. 13: Sériová asynchronní komunikace, převzato z [29].

Maximálně dosažitelná modulační rychlost je  $115200\text{ Bd}$ . Přenosová rychlost vyjádřená v *bit/s* je vždy nižší, neboť jak plyne z obr. 13, ke každým osmi přenášeným bitům užitečné informace jsou přidávány řídicí bity a případně bit paritní.

Triviálním řešením komunikace je přenos po sériové lince jak z přístroje Curiementor do převodníku, tak dále z převodníku do vyhodnocovacího zařízení (pouze s převedením napěťových úrovní). Alternativou je rovněž záznam dat na paměťové médium a jeho následné vyčítání v počítači. Mnohem větší flexibility a zvýšení uživatelského komfortu se však dosáhne aplikací bezdrátového připojení malého rozsahu – vytvořením sítě *PAN*.

Z hlediska efektivního vytvoření *PAN* lze bezdrátovou komunikaci realizovat opticky pomocí *IrDA*, či rádiově pomocí standardů *bluetooth*, *NFC*, *Wi-Fi* nebo *Zigbee*. Méně rozšířenými standardy jsou standardy průmyslové či nové, nastupující zejména v souvislosti s *Internetem věcí (IoT)* a *Průmysl 4.0*. Těmito standardy jsou např. *DASH7*, *LoRa*, *Weightless*, *WirelessHART*, *Z-wave*. Jistou alternativou využití stávající infrastruktury je datová komunikace pro elektrorozvodné sítě (standard IEEE 1901 *HomePlug*) [31].

Komunikace skrze infračervený port standardu *IrDA* [32] využívá modulovaného toku světla v lidskému oku neviditelné vlnové délce  $875\text{ nm}$ . Vysílačem je infračervená či laserová LED, přijímačem pak infradioda. Fyzicky se jedná o asynchronní sériovou komunikaci, napěťové úrovně (resp. proudové impulsy) jsou kódovány do záblesků světla. Nevýhodami tohoto přenosu jsou nutnost přímé viditelnosti obou zařízení s definovaným maximálním prostorovým úhlem, možnost ovlivnění přenosu okolním světlem a z toho plynoucí vyšší chybovost. Standard definuje i *low-power IrDA* s menším dosahem. Vrchol tohoto druhu přenosu byl na přelomu tisíciletí, dnes již není výrobcí spotřební elektroniky podporován a byl nahrazen jinými způsoby komunikace (zpravidla Bluetooth).

Standard IEEE 802.15.1 *Bluetooth* byl koncipován jako náhrada sériové linky či USB komunikace a *IrDA*. Z hlediska definovaného výkonu jej lze rozdělit do tří kategorií. Nejvýkonnější sítě mají dosah cca  $100\text{ metrů}$ , nejméně výkonné, označované jako *Class3* pak s výkonem  $1\text{ mW}$

<sup>19</sup> Někdy označována jako *space state*.



zpravidla kolem jednoho metru. Přenosová rychlost je v jednotkách *Mb/s*, použitá modulace GFSK. Výhodou oproti Wi-Fi jsou lepší možnosti zabezpečení, nevýhodou pak nutnost párování a vyšší energetická spotřeba.

*NFC (Near Field Communication)* je standard založený na ISO 13157 využitelný pro komunikaci na velmi krátkou vzdálenost (řádově centimetry). Přenosová rychlost je v závislosti na typu až 424 *kb/s*.

Standard skupiny IEEE802.11 *Wi-Fi* [33] je dnes nejrozšířenějším prostředkem pro vytváření malých sítí. Využívá bezlicenčního pásma na frekvenci 2,4 *GHz*, přenosová rychlost je až 11 *Mb/s*, dosah v závislosti na výkonu desítky metrů až jednotky kilometrů. Identifikaci sítě zabezpečuje tzv. *identifikátor SSID*, který je v pravidelných intervalech vysílán jako broadcast. Sítě Wi-Fi mohou být tvořeny jako *ad-hoc* (dva rovnocenní klienti, síť *peer to peer* s přímým radiovým dosahem) nebo infrastrukturní s přístupovým bodem (*AP, Access Point*).

Standard dle IEEE 802.15.4 je označován jako *Zigbee* [34][35]. Tento standard se ujal především v průmyslových aplikacích, jeho nespornou výhodou je minimální energetická náročnost, která jej předurčuje pro bateriový provoz. Standard pracuje v bezlicenčních pásmech 868 *MHz* (EU), 902-928 *MHz* (USA) a 2,4 *GHz*, použitá modulace je BPSK nebo O-QPSK. Dosah sítě je řádově desítky metrů, přenosová rychlost je až 250 *kbit/s*.

Z výše uvedených standardů by pro účely této práce postačoval dnes již nepodporovaný *IrDA*, komunikace pomocí *NFC* naopak není masivně rozšířena. Alternativou z hlediska dostupnosti hotových modulů a programové podpory je *Zigbee*. Pro tento průmyslový standard však není připravena současná spotřební elektronika. Volit lze tedy mezi komunikací pomocí *Bluetooth* nebo *Wi-Fi*.

Pakliže by nebyla v procesu měření nutná fyzická přítomnost personálu, bylo by možno k datové komunikaci užít elektrorozvodné sítě.<sup>20</sup>

#### 4.4 Experimentální etapa

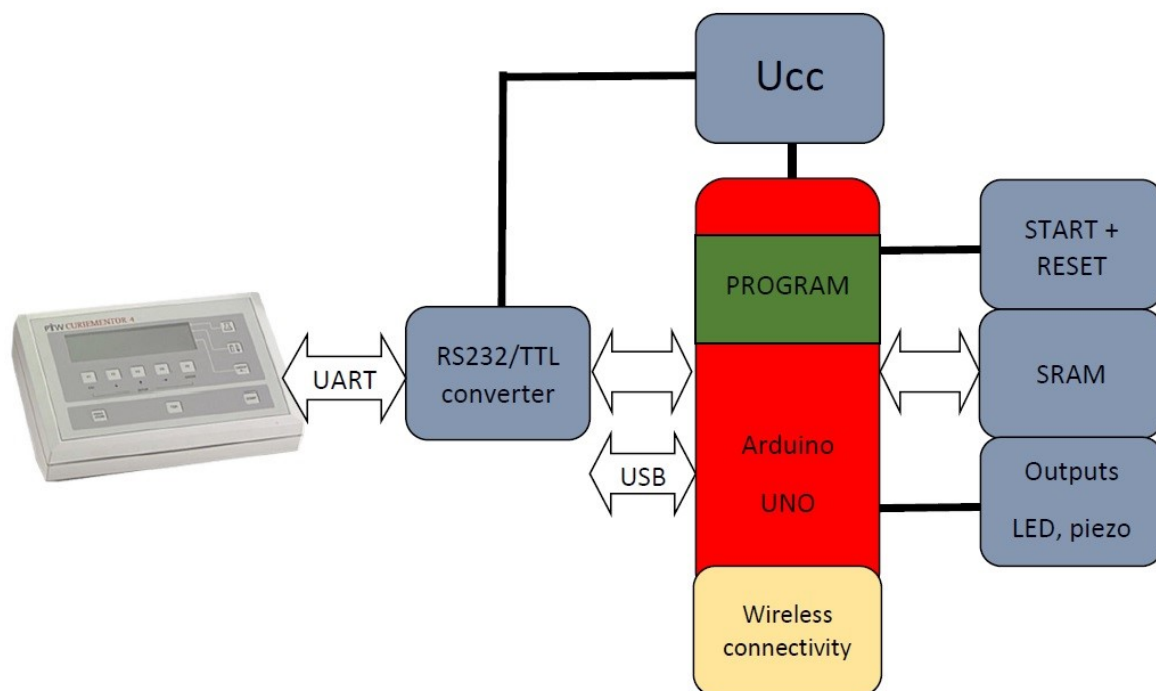
Vývoj funkčního vzorku probíhal ve dvou odlišných etapách. První, experimentální etapa je postavena převážně na HW řešení. Data jsou z měřiče aktivity Curiementor vyčítána pomocí programu uloženého v mikrokontroléru na platformě Arduino<sup>21</sup>. Blokové schéma řešení uvádí obr. 14. Mikrokontrolér je spolu s převodníkem napěťových úrovní a obvodem managementu napájení metalicky spojen s vyhodnocovací jednotkou Curiementoru. Po načtení všech dat do interní paměti jsou změřené hodnoty nahrány do připojeného vyhodnocovacího počítače, kde jsou dále zpracovávány.

Jádrem systému je vývojový shield Arduino Uno, na který jsou modulárně připojeny ostatní komponenty. Jedná se o převodník napěťových úrovní, napájecí modul, ovládací tlačítka a výstupní moduly – LED a reproduktor ve formě piezoměniče. Moduly paměti a bezdrátové konektivity nebyly v této etapě použity.

---

<sup>20</sup> Toto řešení by dále zjednodušilo práci personálu (měření na všech přístrojích by pracovník obsloužil z jednoho místa, které by mohlo být současně i vyhodnocovací stanicí).

<sup>21</sup> Program pro platformu Arduino se nazývá též skatch.



Obr. 14: Blokové schéma experimentálního řešení.

Vlastní rutina uložená v paměti mikrokontroléru zabezpečuje spuštění programu, selftest, změření a uložení naměřených hodnot s jejich následným exportem. Indikace aktuálních stavů je realizována pouze prostřednictvím vícebarevné LED a to kombinací vyzařované barvy a středy svitu (0,5 Hz, 2 Hz a trvalý svit).

Tab. 6: Indikace stavů experimentálního řešení.

čas [s]															aktuální stav
0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	probíhá načítání dat
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	načítání dat dokončeno
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	probíhá export dat
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	chyba

Optickou indikaci lze doplnit o piezoelement, zejména k hlášení chybových stavů. K ovládání dataloggeru slouží dvě tlačítka – ke spuštění měření a k resetu celého programu<sup>22</sup>.

Prvním nezbytně nutným krokem je převod napětových úrovní protokolu RS-232 do logiky TTL. Toto lze nejjednodušeji provést pomocí dvou komplementárních tranzistorů doplněných o pasivní prvky, výhodnější je užití integrovaných převodníků či přímo hotového modulu [36].

<sup>22</sup> Reset programu zapříčiní ztrátu všech doposud změřených hodnot.



Pomocí hotového modulu step-down měniče lze rovněž realizovat potřebné napájení. Více se problematice věnuje kap. 4.5.

Stěžejním prvkem obvodu je vlastní mikrokontrolér. Arduino je open source platforma založená na mikrokontroléru ATmega 328 od firmy Atmel a grafickém vývojovém prostředí. Existuje celá řada desek různých formátů a výkonů, pro realizaci bylo zvoleno Arduino Uno. Toto Arduino obsahuje celkem 14 I/O digitálních pinů a 6 pinů analogových. Šest digitálních pinů je také možné použít na softwarově řízený PWM výstup. Frekvence procesoru je 16 MHz, připojení k PC (programování) je realizováno pomocí USB, napájet lze externím zdrojem 7-12 V nebo přímo přes USB [37].

Množství I/O portů i velikost paměti je pro tento účel s rezervou dostačující, výhodou užití je i možnost napájení přes USB, celé zařízení pak lze napájet pomocí externího zdroje +5 V. V navrženém řešení je užito pouze digitálních I/O portů, analogové nejsou využity.

Platforma Arduino běžně využívá paměti FLASH, SRAM, EEPROM (v závislosti na modelu). Paměti typu FLASH a EEPROM mají omezený počet zápisů (cca 100 tis.), avšak uchovávají si uložené hodnoty i při přerušení napájení. Naproti tomu paměť SRAM je počtem zápisů neomezená. Informaci o celkové paměti i o paměti aktuálně využitě lze zjistit z Arduino IDE. Údaje o dostupných pamětech a jejich velikosti u platformy Arduino poskytuje např. zdroj [37][38]. Pro vlastní program lze využít FLASH nebo EEPROM, pro data pak SRAM.

Experimentálně zvolené Arduino UNO disponuje pamětmi EEPROM 1 KB, SRAM 2 KB a FLASH 32 KB. Paměť 32 KB pro vlastní program je dostačující, limitujícím faktorem je paměť dat SRAM. Jelikož Arduino UNO disponuje SRAM o kapacitě 2 KB a cílem konstrukce je využití interní paměti Arduina, bez použití externích modulů s SRAM pamětí, je vhodné přijatá data ukládat v hexadecimálním tvaru. Procesor nemusí v tomto případě nic převádět, neboť data získaná z Curiementoru již v hexadecimálním tvaru jsou, hodnoty lze tedy ukládat do paměti bez konverze.

Obvodově je k vlastnímu mikroprocesoru a výše zmíněným modulům přidáno jen několik součástek. Mimo hlavního spínače, tlačítek RESET a START, vícebarevné LED a konektorů se jedná pouze dva rezistory 10 kΩ ve funkci pull-down rezistorů. Vlastní zapojení obsahuje pro účely vývoje ještě dvě LED k s příslušnými rezistory k indikaci provozu na vodičích *RxD* a *TxD*.

Alternativou k vyčítání naměřených dat by byl přenos prostřednictvím paměťového média – SD karty.

Výhoda kompletního řešení na bázi Arduino kompatibilních modulů spočívá v EMC kompatibilitě a CE certifikaci (viz kap. 9).

SW část sestává jednak z programu, který zajišťuje ukládání načtených dat do paměti čtecího zařízení a dále z vyhodnocovacího algoritmu (tento algoritmus je totožný pro experimentální i finální řešení, viz kap. 6).

Sketch v jazyce Wiring<sup>23</sup> [39] obsahuje procedury k vyčítání dat dle pevně zadaných parametrů (počet měření a prodlevu mezi nimi), ukládání změřených hodnot do interní SRAM paměti, jejich následný export po sériové lince do PC, watchdog a reset uložených hodnot. Data ukládaná do paměti Arduino obsahují pouze nezbytně nutné údaje, tzn. hlavičku - postačuje jednoznačná identifikace přístroje pomocí výrobního čísla a datum (resp. čas) počátku měření, přičemž datum a čas nejsou systémovými hodnotami dataloggeru. Za identifikačními údaji následuje posloupnost

---

<sup>23</sup> Jazyk Wiring je ve své podstatě jazyk C++ doplněný o řadu knihoven a maker.

naměřených hodnot. Jakákoliv změna parametrů měření (počet měření a časový odstup mezi měřeními) je možná pouze přímou změnou kódu a opětovným nahráním do mikrokontroléru. Dále program obsahuje identifikaci základních chybových stavů (přetečení paměti dat...)

Výhodou výše uvedeného řešení je jednoduchý postup získání dat zasunutím konektoru a stiskem tlačítka a po obejití všech stanic export všech hodnot delším podržením tlačítka.

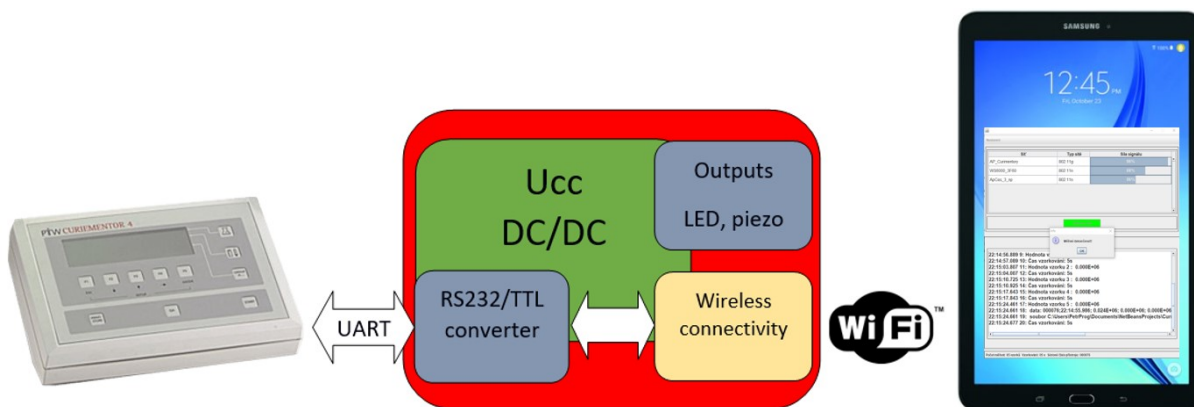
Zásadním nedostatkem je chybějící rozhraní pro komunikaci s uživatelem. Především nemožnost nastavení jakéhokoliv parametru bez nutnosti úpravy programu a jeho nahrání do mikrokontroléru a absence přehledu o aktuálním statusu vyčítání včetně komplikované prezentace chyb. Tyto nevýhody jsou řešitelné např. připojením displaye s radičem, čímž ale vzrůstá náročnost obsluhového programu. Nevýhodou je rovněž nutnost neustálého připojování a odpojování HW.

Řešením výše uvedených nedostatků by bylo nahrazení Arduina mikropočítačem (např. Raspberry Pi nabízí snazší prezentaci dat prostřednictvím displaye), nicméně toto řešení je pro účel vyčítání dat robustní a cenově nevýhodné.

## 4.5 CuriementorLogger

Finální řešení praktické části této práce využívá výpočetního výkonu přenosného zařízení (chytrého telefonu, resp. tabletu) k chodu programu i vnitřní paměť k ukládání naměřených hodnot. Výhodami tohoto řešení jsou rovněž bezdrátová konektivita a možnost využití kvalitního grafického rozhraní reprezentovaného displayem přenosného zařízení a to jak pro komunikaci s uživatelem, tak i k SW ovládání základních parametrů.

Z pohledu HW části dataloggeru je modulární platforma Arduino u funkčního vzorku nahrazena jednoúčelovými integrovanými obvody<sup>24</sup>. Na zakázkově vyrobené DPS jsou umístěny tři integrované obvody: převodník RS-232 z a do TTL úrovní, vysílač s přijímačem Wi-Fi a napájecí modul (stabilizátor napětí) spolu s nejnutnějšími pasivními součástkami, obr. 15:

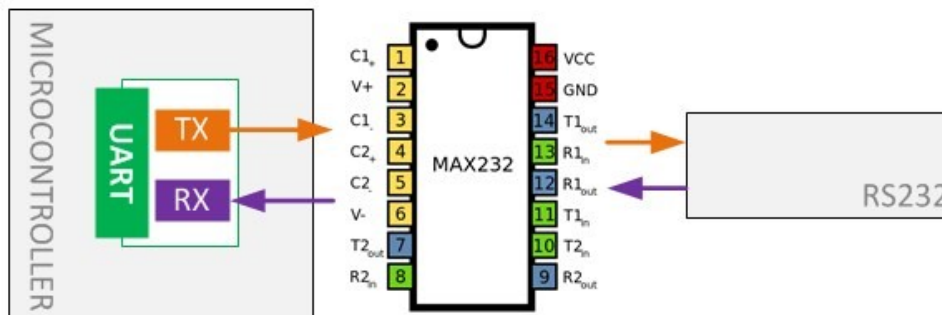


Obr. 15: Blokové schéma funkčního vzorku.

Převodník mezi úrovněmi RS-232 a TTL [40][41][42] je realizován pomocí IO MAXIM MAX3232CPE [43]. Jedná se o osvědčený dvoukanálový driver/receiver pro RS-232 v pouzdře DIL 16. Grafické schéma vstupů a výstupů je zobrazeno na obr. 16, obvod ke své činnosti potřebuje minimum externích součástek, mimo zabezpečení napájecího napětí pouze čtyři elektrolytické kondenzátory s kapacitou  $0,1 \mu F$ , které ve funkci nábojových pump vytváří napětí potřebná pro

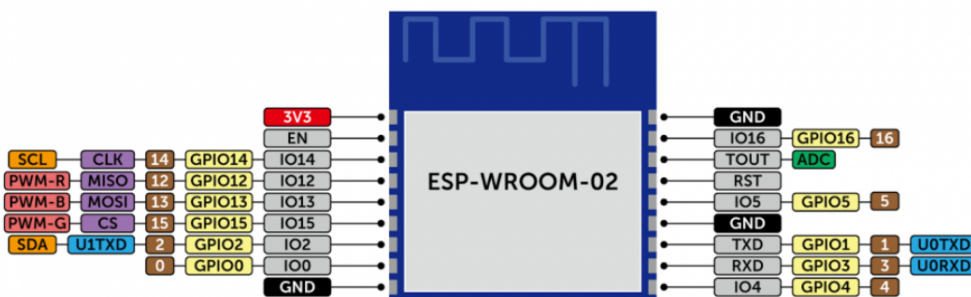
<sup>24</sup> Wi-Fi modul ESP-WROOM-02 je však také Arduino kompatibilním modulem.

napětíové úrovně RS-232. Z důvodu snížení sériových impedancí jsou užity kondenzátory v tantalovém provedení. Při požadavku na co nejmenší rozměry či co nejmenší energetickou náročnost by bylo možno použít klonů tohoto IO (některé jsou v dispozici i s integrovanými nábojovými pumpami), zde užitý IO reflektuje požadavek na snížené napájecí napětí 3,3 V, které je společné s napájením modulu Wi-Fi.



Obr. 16: Názorné zapojení převodníku řady MAX232, převzato z [44].

Modul ESP-WROOM-02 [45][46][47][48] je modulárním Wi-Fi vysílačem/přijímačem ve standardu 802.11 b/g/n. Napětí potřebné k provozu je v rozmezí 2,7 až 3,6 V, minimální potřebný proud je 500 mA. Bezdrátovou komunikaci obstarává anténa se ziskem 2 dB integrovaná formou meandru do DPS. Modul podporuje sběrnice GPIO, I2C, I2S, PWM, SDIO, SPI, UART a zabezpečení pomocí WPA, resp. WPA2. Šifrování je možné pomocí WEP, TKIP, AES. Celý modul je umístěn na nosném substrátu s pájecími ploškami určenými pro povrchovou montáž. Číslování jednotlivých pinů 18ti pinového modulu je dle zvyklostí s počátkem vlevo nahoře a dále proti směru hodinových ručiček. Přehledné grafické schéma vstupů a výstupů ukazuje obr. 17:



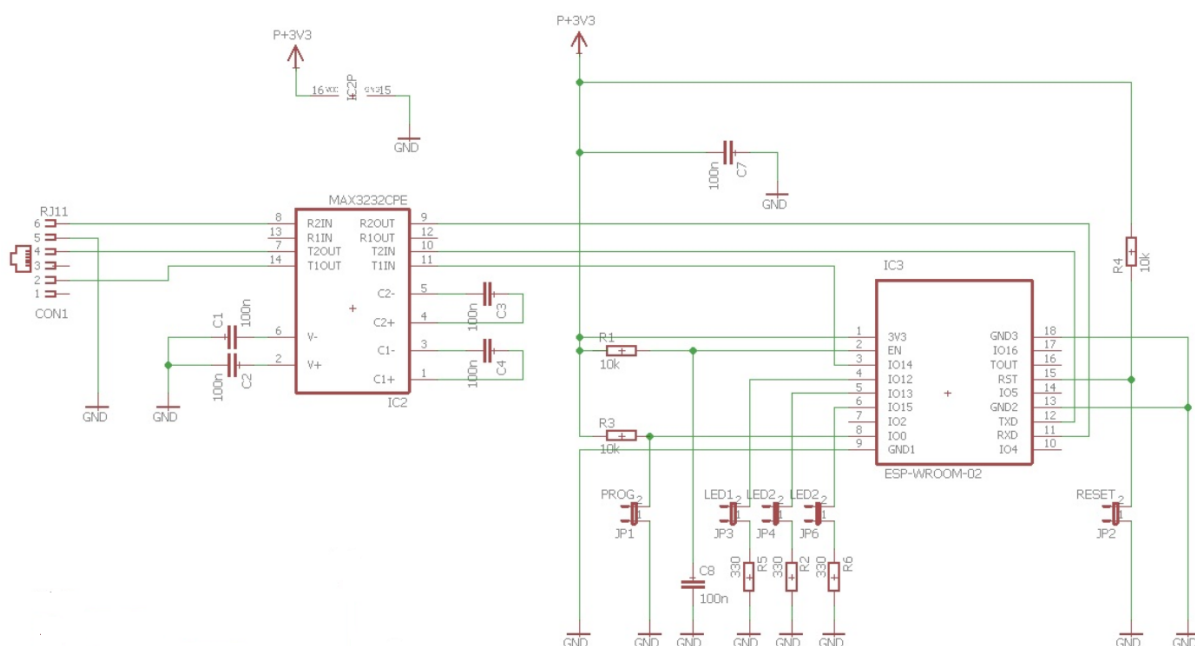
Obr. 17: Názorné zapojení modulu ESP-WROOM-02, převzato z [49].

Modul ESP-WROOM-02 v sobě integruje vlastní mikroprocesor a paměti SRAM, RAM a FLASH. Sketch k obsluze komunikace v jazyce Wiring je prostřednictvím Arduino IDE implementován do interní FLASH paměti. Struktura programu vychází z doporučení výrobce a je pouze minimálně upravena, resp. doplněna o některé funkcionality (indikaci stavů prostřednictvím LED), výpis programu je uveden v příloze. K provozu postačují z externích součástek čtyři rezistory 10 kΩ, blokovací kondenzátory a tlačítka pro programování a reset. Oproti doporučenému zapojení není u funkčního vzorku implementováno tlačítko resetu, restart programu se provádí přerušením napájení. Navíc jsou však k výstupům GPIO 12, 13 a 15 připojeny indikační LED využívané pro SW indikaci chodu programu.

Požadavek na hodnotu napájecího napětí vychází z potřeb modulu ESP-WROOM-02, který ke své činnosti vyžaduje napájecí napětí 3,3 V. Právě z důvodu unifikace napájecího napětí s modulem Wi-Fi je užito převodníku se sníženým napájecím napětím 3,3 V.

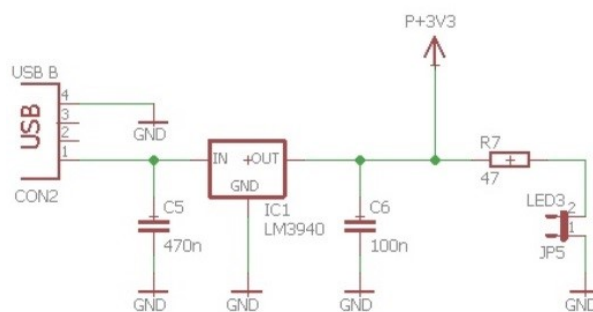
Napájení je realizováno komerčně dostupným síťovým zdrojem s USB výstupem. Nutné snížení napětí z 5 V na 3,3 V lze realizovat několika způsoby. Nejjednodušší varianta snížení napětí rezistorem či diodou zhoršuje kvalitu stabilizace, užití třisvorkového stabilizátoru není možné z důvodu jeho velkého vnitřního úbytku napětí. Nejjednodušší je tedy užití DC-DC step-down měniče (v integrované podobě je dostupný i jako Arduino kompatibilní modul) či nízkovoltového napěťového regulátoru. Zcela triviální možnost, tj. získání napájecího napětí přímo ze sériového portu Curiementoru byla pro velké proudové nároky obvodu zavržena. V navrženém zapojení je užito LDO napěťového regulátoru LM3940 [50] v pouzdře TO 220.

Kompletní elektrické schéma převodníku a vysílače (bez napájecí části):



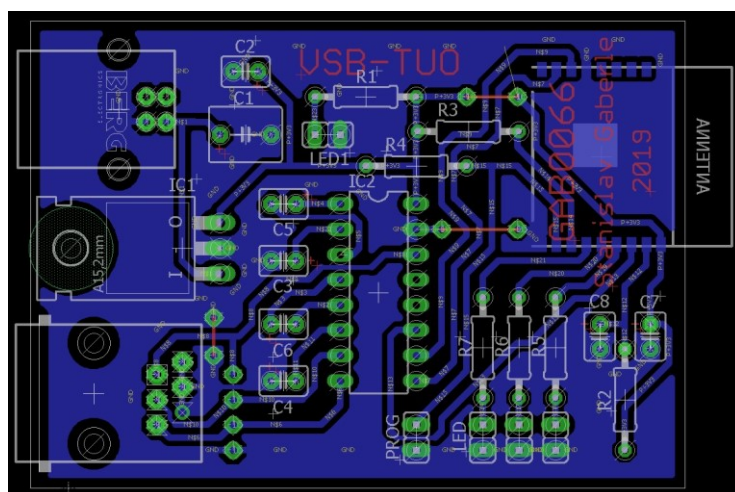
Obr. 18: Elektrické schéma HW části.

Mimo to je DPS osazena konektorem pro připojení napájecího napětí (USB typu B), LED ovládanými sketchem nahaným v ESP-WROOM-02, součástkami nutnými k provozu IO (rezistory a kondenzátory) a tlačítka RESET a PROGRAM.



Obr. 19: Elektrické schéma napájecí části.

DPS je navržena v programu Eagle jako oboustranná jednovrstvá pro konvenční montáž (mimo modulu ESP-WROOM-02). Původní myšlenka celé konstrukce technologií povrchové montáže s pouzdry v provedení *SOx* byla pro nedostatečnou robustnost nahrazena *THT* řešením.

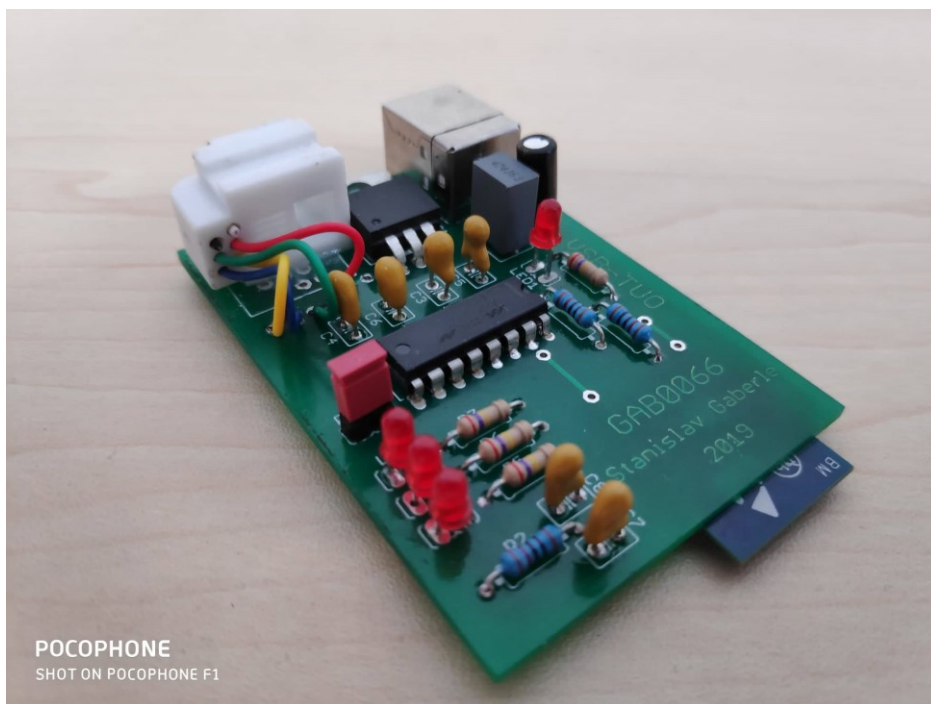


Obr. 20: DPS, lícová strana (pohled TOP – ze strany součástek).

Tab. 7: Seznam součástek.

pozice	hodnota (parametr)	poznámka
C1	470 nF	
C2	33 $\mu$ F/16 V	
C3, C4, C5, C6, C7, C8	100 nF	tantalové provedení
CON1	RJ 11	užito 4 vodičů
CON2	USB-B	
IO1	LM3940	
IO2	MAX3232CPE	
IO3	ESP-WROOM-02	SMD
LED1	green	průměr 3 mm
LED2, LED3, LED4	red	průměr 3 mm
R1, R5, R6, R7	330 $\Omega$	
R2, R3, R4	10 k $\Omega$	

Celá HW část je vestavěna do komerčně dostupné krabičky z eloxovaného hliníku o vnějších rozměrech cca 80 x 50 x 20 mm. Na vnější straně krabičky je umístěna signalizační LED, vyveden konektor napájení reprezentovaný standardem USB-B a vstup datového vodiče RS-232 zakončený konektorem RJ11.



Obr. 21: Funkční vzorek.

K provozu je nutný externí zdroj napětí 5V/500 mA s USB výstupem a napájecí kabel s USB-B konektorem. Komunikační kabel mezi vyhodnocovací jednotkou Curiementoru a modulem CuriementorLogger je realizován jako čtyřvodičový (přenášejí se signály *RxD*, *TxD*, *RTS* a *GND*) s konektory RJ11 na straně CuriementorLoggeru a konektorem D-Subminiature na straně Curiementoru.



## 5 CuriementorApp

Program pro vyčítání dat do přenosného zařízení (chytrého telefonu, tabletu, příp. laptopu) *CuriementorApp* je realizován jako nativní aplikace pro MS Windows. Aplikace je naprogramována v jazyce *Java* [51] v integrovaném vývojovém prostředí *NetBeans*. Mimo hlavní funkce načítání dat a jejich ukládání do interní paměti přístroje aplikace zajišťuje parametry vlastní komunikace<sup>25</sup>, umožňuje uživatelské nastavení základních parametrů (počet měření a prodlevu mezi nimi) signalizuje aktuální stav procesu a vybrané chybové stavy. Rutina programu využívá k dotazování Curiementoru vybraných příkazů popsaných v kap. 3.3.1, povely iniciují následující procesy:

***S Read device status***, pakliže by byl aktuální status přístroje jiný než měřící, nahlásí program chybu,

***DTD Read date of real time clock***, vytvoří adresář s názvem dle systémového data přístroje,

***SER Read serial number of device***, vytvoří soubor s názvem dle sériového čísla přístroje,

***DTT Read time of real time clock***, do názvu souboru vepíše systémový čas přístroje,

***BKG Start a background measurement***, změří hodnotu pozadí,

***DBG Read background value***, do prvního sloupce uloží hodnotu pozadí,

***STA Start a measurement***, změří hodnotu 1. vzorku,

***MV Read measured value***, uloží hodnotu 1. vzorku do druhého sloupce.

Poslední dva příkazy *STA* a *MV* se cyklicky opakují až do počtu *n* (dle nastavení počtu měření, implicitně *n*=20) a ukládají změřenou hodnotu do třetího a dalších sloupců. Vývojový diagram algoritmu je uveden v příloze. Po dokončení celé procedury se program zastaví a indikuje konec měření. Po navázání spojení s dalším přístrojem se chod programu opakuje. Data každé sady měření jsou ukládána do samostatného \*.csv souboru s názvem ve formátu:

Tab. 8: Princip pojmenování výstupního souboru.

DEV	_	serialnumber	_	hh	_	mm	_	ss	_	-	x	_	S	.	csv
-----	---	--------------	---	----	---	----	---	----	---	---	---	---	---	---	-----

kde *DEV* je prefix, *serialnumber* výrobní číslo přístroje, *hh*, *mm*, *ss* čas vytvoření souboru, *x* doba prodlevy mezi měřeními jednotlivých vzorků a *S* postfix. Aplikace vytváří vlastní adresářovou strukturu, všechna měření z jednoho dne, resp. všechny \*.csv soubory, jsou ukládány do aplikací vytvořeného adresáře s názvem aktuálního data. Při zjištění jakékoliv chyby se tato v podobě kódu (kap. 3.3.2) zobrazí v informačním okně aplikace.

Struktura programu je rozdělena dle funkčnosti do logických skupin – balíčků. Aplikace *CuriementorApp* obsahuje celkem 12 balíčků s jednotlivými *třídami* a *interface*<sup>26</sup>:

<sup>25</sup> Interface Curiementoru nepodporuje handshake [17].

<sup>26</sup> Zcela samostatnými objekty jsou ikony použité v GUI.

## **CuriementoryApp**

*CuriementoryApp.java*

## **CuriementoryApp.com**

*CurieCmdSheduler.java* – třída pro odesílání dávek příkazů a příjem dat

*CurieCommIface.java* – interface pro deklaraci konstant příkazů

*CurieConn.java* – třída pro připojení k serveru

*CurieConnEvent.java* – třída s objekty události pro třídu připojení *CurieConn*

*CurieConnListerner.java* – interface událostních metod

*CurieConnObject.java* – třída s informacemi o připojení

## **CuriementoryApp.com.buffer**

*CurieBuffer.java* – třída s FIFO bufferem

*CurieBufferListener.java* – interface událostních metod

## **CuriementoryApp.com.object**

*CurieCommObject.java* – třída odeslání příkazů a přijetí odpovědi

*CurieCommObjectEvent.java* – třída s objekty události pro třídu připojení *CurieCommObject*

*CurieCommObjectListener.java* – interface událostních metod

## **CuriementoryApp.csv**

*CsvWriter.java* – třída zápisu dat do \*.csv souboru

*Directory.java* – třída vytvoření adresářové struktury

## **CuriementoryApp.gui**

*ButtonPanel.java* – třída panelu s tlačítky

*DefaultGuiSettings.java* – třída deklarace hlavních atributů GUI

*FieldPanel.java* – třída panelu textového pole

*FlowPanel.java* – třída, GUI kontejner s předdefinovaným flowlayout managerem

*InfoBar.java* – třída informačního řádku

*IpAdressPanel.java* – třída pro nastavení připojení

*LabeledIcon.java* – třída grafického indikačního prvku

*LogPanel.java* – třída informačního okna

*MainFrame.java* – hlavní třída GUI

*MenuBar.java* – třída nabídkového menu

*PanelList.java* – třída pro výběr položky z nabídky



*SliderPanel.java* – třída panelu s posuvníkem

### **CuriementoryApp.gui.dialog**

*DlgMeasureParameters.java* – třída dialogu pro nastavení parametru

*DlgNetworkSettings.java* – třída dialogu nastavení sítě

*FlowDialog.java* – parent třída pro *DlgMeasureParameters* a *DlgNetworkSettings*

*OkCancelPanel.java* – třída dialogu OK a Cancel

### **CuriementoryApp.gui.framepanels**

*ConnectionPanel.java* – třída tlačítka pro připojení k serveru

*InfoBarPanel.java* – třída spodního informačního řádku

*InfoPanel.java* – třída logovacího okna

### **CuriementoryApp.gui.table**

*WifiTable.java* – třída grafického prvku tabulky sítě

*WifiTableModel.java* – datový model tabulky sítě

### **CuriementoryApp.gui.table.renderers**

*ColorRenderer.java* – třída vykreslování řádků tabulky připojení

*ProgressBarRenderer.java* – třída vykreslování síly signálu

### **CuriementoryApp.ini**

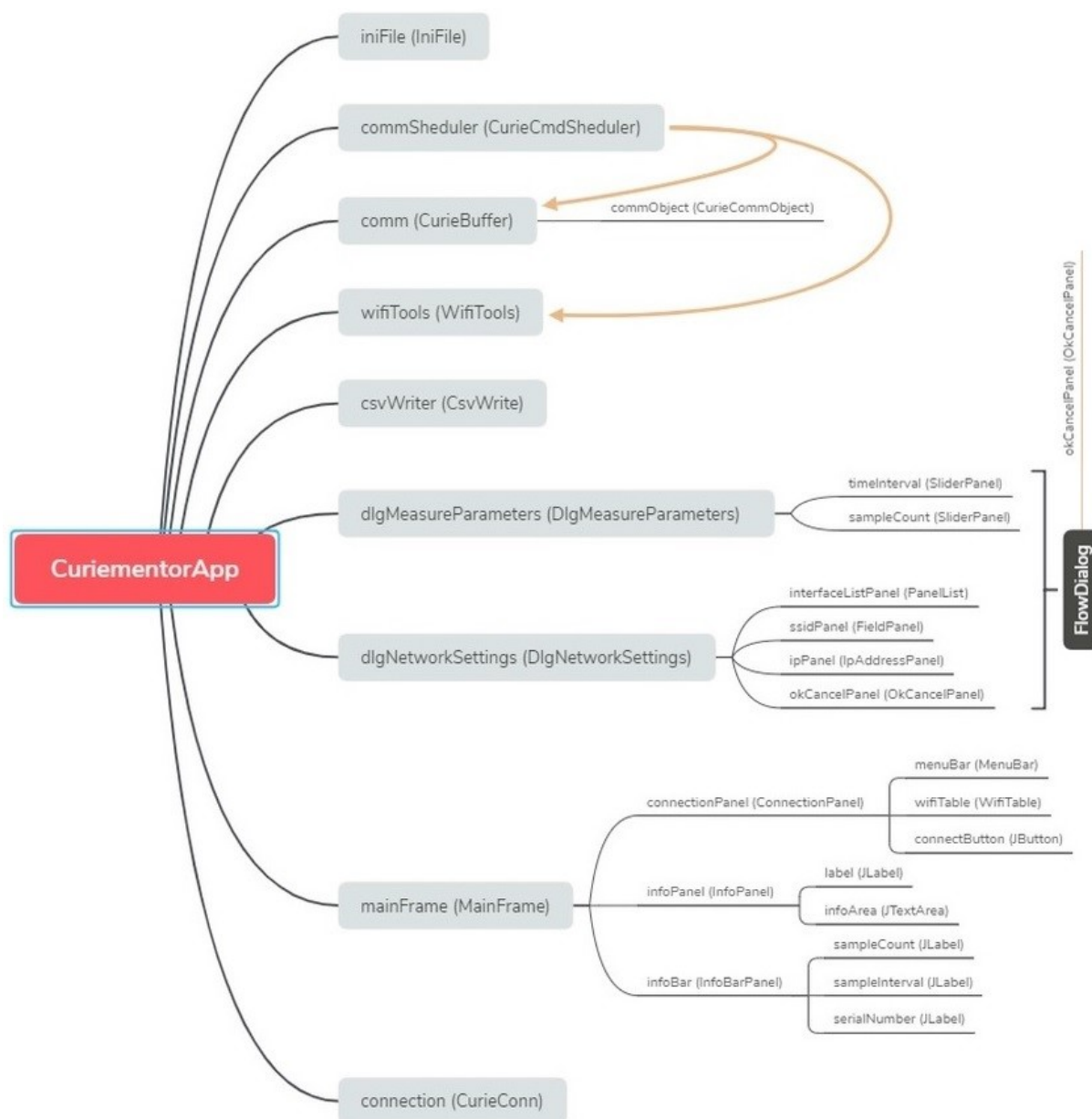
*IniFile.java* – třída načtení a zápisu dat \*.ini souboru

### **CuriementoryApp.wifi**

*WifiTools.java* – třída pro práci s Wi-Fi konektivitou

V samostatném balíčku *ico* jsou umístěné ikony GUI, jedná se o obrázky ve formátu \*.png. Konkrétně jde o celkem 15 ikon: *accept*, *add*, *cancel*, *connect*, *cross*, *disconnect*, *disk*, *garbage*, *nodirection*, *ok*, *play*, *restart*, *run*, *run\_no\_motion*, *stop*.

Strukturu programu a jeho vnitřní vazby uvádí myšlenková mapa vytvořená v programu *XMind*, kompletní program je uložen na datovém nosiči.

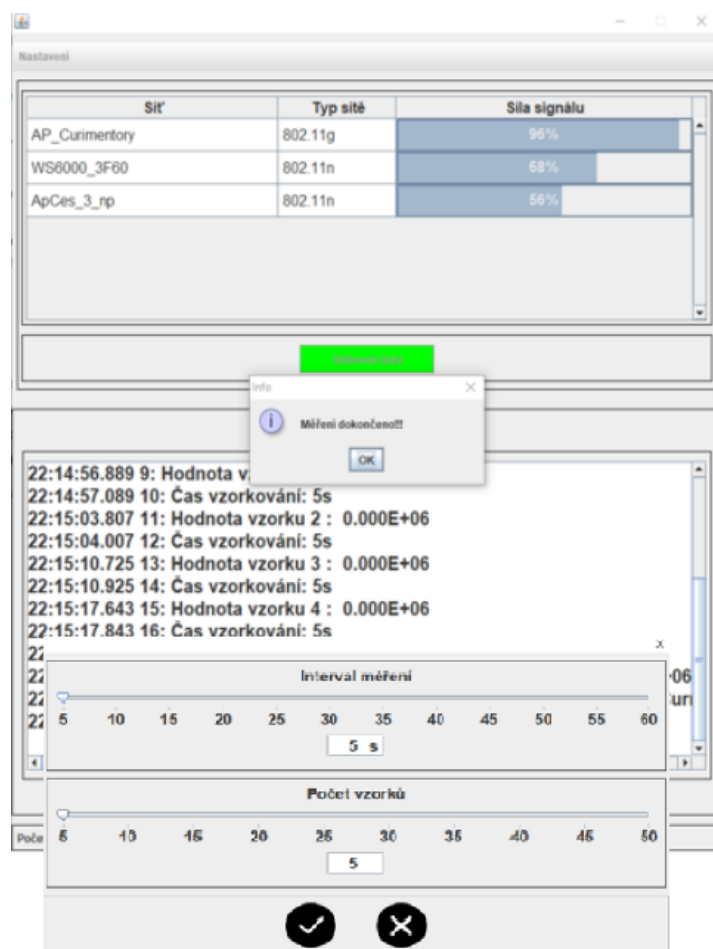


Obr. 22: Myšlenková mapa - struktura aplikace CuriementorApp.

## 5.1 GUI CuriementorApp

Grafické rozhraní tvoří nadstavbu ovládacího programu *CuriementorApp*. Primární funkcí GUI je nabídka volby aktuálně dostupných Wi-Fi sítí a jejich parametrů s možností připojení, nastavitelnými parametry jsou počet měření a časový rozestup mezi nimi. GUI umožňuje obsluhu intuitivní ovládní, zobrazení základních stavů a snadný export naměřených dat do prostředí MS Excel.

GUI umožňuje ovládat základní funkce s ohledem na požadavek spustitelnosti na široké škále přenosných zařízení s rozdílnými HW parametry pracujících s OS MS Windows (a samozřejmě s ohledem na co nejmenší HW nároky). Grafické rozhraní je koncipováno jako okno s trvalým zobrazením dostupných sítí s parametry *název sítě*, *typ sítě* a *intenzita signálu* ve své horní části a informační lištou v dolní části. Střední část je vyhrazena oknu s informacemi o aktuálně probíhajícímu procesu, v případě chyby je tato zobrazena v samostatném informačním okně.



Obr. 23: Náhled GUI.

## 6 CuriementorStat

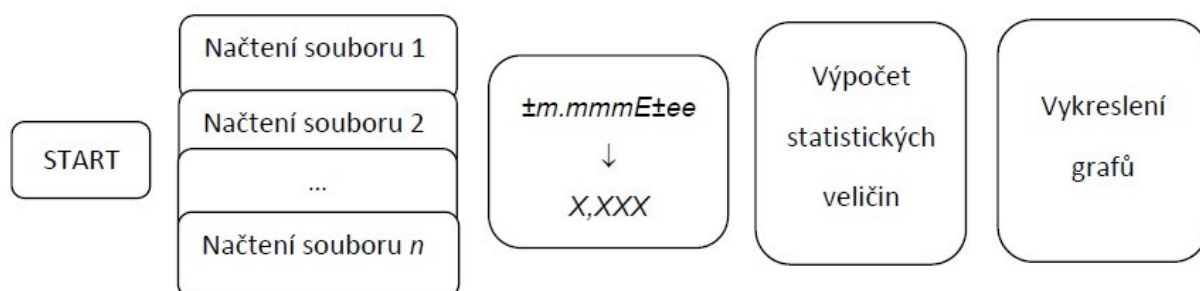
Vyhodnocovací a statistická část této práce je vytvořena v prostředí MS Excel [52]. Toto řešení reflektuje a zachovává současné návyky obsluhujícího personálu, v případě potřeby ponechává možnost další práce se získanými daty a zároveň využívá sílu funkcí nejrozšířenějšího tabulkového procesoru. Na straně vývoje pak není třeba vytvářet žádný program, který by bylo třeba uživatelem uchovávat a instalovat na vyhodnocovací stanice.

Data odeslaná z programu *CuriementorApp* ve formátu \*.csv (obr. 24) jsou načtena do aktuálně otevřeného souboru v MS Excel a následně ručně či pomocí makra<sup>27</sup> *CuriementorStat* upravena.

	A
1	000076;1.2. 2019;11:53:46; 0.028E+06; 0.000E+06; 0.000E+06; 0.000E+06; 0.000E+06; 0.000E+06
2	
3	

Obr. 24: Načtené hodnoty v \*.csv formátu.

Mimo výpočtu statistických funkcí a grafického znázornění dat zajišťuje obsluha nebo makro spojení souborů z jednotlivých měření v jeden soubor, rozdělení naměřených hodnot do buněk, výmaz prvních pěti nevalidních hodnot a převod naměřených hodnot z matematického formátu<sup>28</sup> na desetinné číslo.



Obr. 25: Blokové schéma CuriementorStat.

Makro je vytvořeno záznamem procesů v tabulkovém editoru a následně upraveno ve VBE. V prostředí tabulkového procesoru je pro potřeby ZPS a QC využito následujících matematických funkcí [52][53]:

- 1) Aritmetický průměr argumentů, tj. změřených hodnot (implicitně n=20 hodnot) (10):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

V prostředí MS Excel je použita funkce PRŮMĚR.

<sup>27</sup> Samotné makro není součástí této práce a bude konfigurováno na základě požadavků zadavatele.

<sup>28</sup> Odpověď příkazu MV je ve formátu ±m.mmmE±ee.

- 2) Směrodatná odchylka, tj. vyjádření odlišnosti hodnot od průměrné hodnoty. Pro její výpočet je nutné znát rozptyl (varianci)  $\sigma^2$ , tj. střední hodnotu kvadrátů odchylek od střední hodnoty (11):

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^2$$

Směrodatná odchylka je pak odmocninou z rozptylu (12):

$$\sigma = \sqrt{D(X)}$$

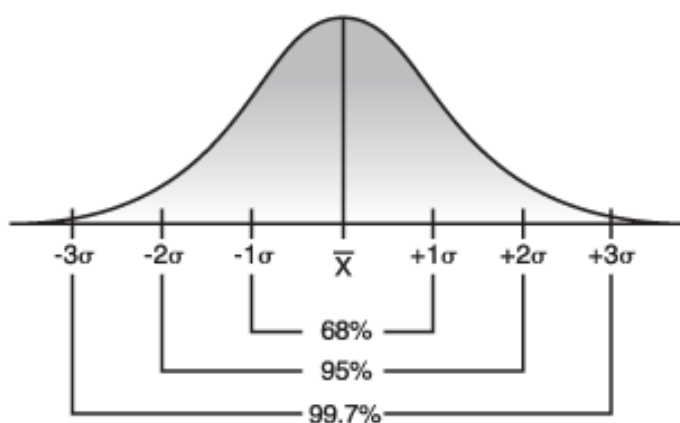
V prostředí MS Excel je využita funkce SMODCH<sup>29</sup>

- 3) Variační koeficient je definován jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru, matematicky (13):

$$v_x = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Jelikož jsou ze statistického hlediska získané hodnoty malým souborem dat (počet měření je dán rozumným časem nutným k jeho realizaci), mohou se i za předpokladu dodržení relativně stálých podmínek měření při získávání výběrového souboru vyskytnout výrazně odlišné hodnoty [54]. Tyto odchýlené hodnoty mohou být následkem nepředpokládané kombinace faktorů či jiného neuvažovaného faktoru, v tomto případě vzniklé např. přebuzením ionizační komory. Takto zaznamenané hodnoty spadají do hrubých chyb měření. K jejich eliminaci (za předpokladu vysoké pravděpodobnosti, že do výběrového souboru skutečně nepatří) se užívá statistických metod.

Hodnoty změřené přístrojem Curiementor jsou souborem dat s normálním rozdělením, které prezentuje *Gaussova funkce*.



Obr. 26: Gaussova křivka a pravidlo 3 $\sigma$ , převzato z [55].

<sup>29</sup> Funkce SMODCH je v novějších verzích MS Excel nahrazena jinými funkcemi, kvůli zpětné kompatibilitě je však její funkcionalita zachována.

Pro soubor dat s normální náhodnou veličinou (tedy normální rozdělením) lze orientačně odlehle či extrémní hodnoty vyhodnotit pomocí pravidla  $\pm 3\sigma$ <sup>30</sup> a to tak, že se z výběrového souboru dat (avšak bez předpokládané extrémní hodnoty) určí aritmetický průměr a směrodatná odchylka  $\sigma$ . Pakliže se odchylka mezi střední hodnotou a předpokládanou extrémní hodnotou liší o více jak  $\pm 3\sigma$ , jedná se o extrémní hodnotu a z výběrového souboru se vylučuje.

Silnějšími nástroji statistické analýzy dat pro odstranění extrémních hodnot jsou parametrické či neparametrické testy: *Grubbsův test*, *Dixonův test*, *metoda krabicového diagramu* a další [54].

*Grubbsův test extrémních odchylek* využívá formulace hypotéz na předem zadané hladině významnosti  $\alpha$ . Nulová hypotéza  $H_0$  vyjadřuje extrémní hodnotu výběru, zatímco alternativní hypotéza  $H_1$  říká, že vybraná hodnota výběru extrémní není. Dále jsou k provedení testu třeba střední hodnota  $\bar{x}$ , směrodatná odchylka  $\sigma$  a vzestupně seřazení hodnot výběrového souboru do variační řady. Testovací kritérium spočívá v určení první  $T_1$  a poslední  $T_n$  hodnoty vzestupně seřazené variační řady dle vzorců (14, 15):

$$T_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{\sigma}$$

$$T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{\sigma}$$

Kritická hodnota testovacího kritéria se určí dle počtu stupňů volnosti a zvolené hladině významnosti (0,01 nebo 0,05) z tabulek. Hypotézu  $H_0$  přijímáme, pokud obě spočtené hodnoty  $T_1$  a zároveň  $T_n$  jsou menší nebo rovny  $T_{n,\alpha}$ .

Alternativním textem je i *Dixonův test extrémních odchylek*<sup>31</sup>. Základem je opět formulace hypotéz. Hypotéza  $H_0$  předpokládá, že hodnota výběru není extrémní, zatímco negující hypotéza  $H_1$  extrémní hodnotu předpokládá. Dále je nutné znát variační rozpětí  $R$  ( $x_{\max} - x_{\min}$ ) a hodnoty výběrového souboru vzestupně seřadit do variační řady. Testovací kritérium spočívá ve výpočtu parametrů  $Q_1$  a  $Q_n$  (16, 17):

$$Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{R}$$

$$Q_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{R}$$

Kritická hodnota testovacího kritéria se opět určí dle počtu stupňů volnosti a zvolené hladině významnosti (0,01 nebo 0,05) z tabulek. Hypotézu  $H_0$  přijímáme, pokud je alespoň jeden z parametrů  $Q_1$  nebo  $Q_n$  menší než z tabulek určená hodnota  $Q_{n,\alpha}$ .

Využitelným testem k určení odlehklých hodnot s ohledem na možnost realizace v MS Excel je *metoda krabicového grafu*. Ta spočívá v odhadu střední hodnoty, stanovení kvartilů  $x_{0,25}$  a  $x_{0,75}$

<sup>30</sup> V anglosaské literatuře známé jako Rule 68-95-99,7.

<sup>31</sup> Někdy též nazýván Q test.

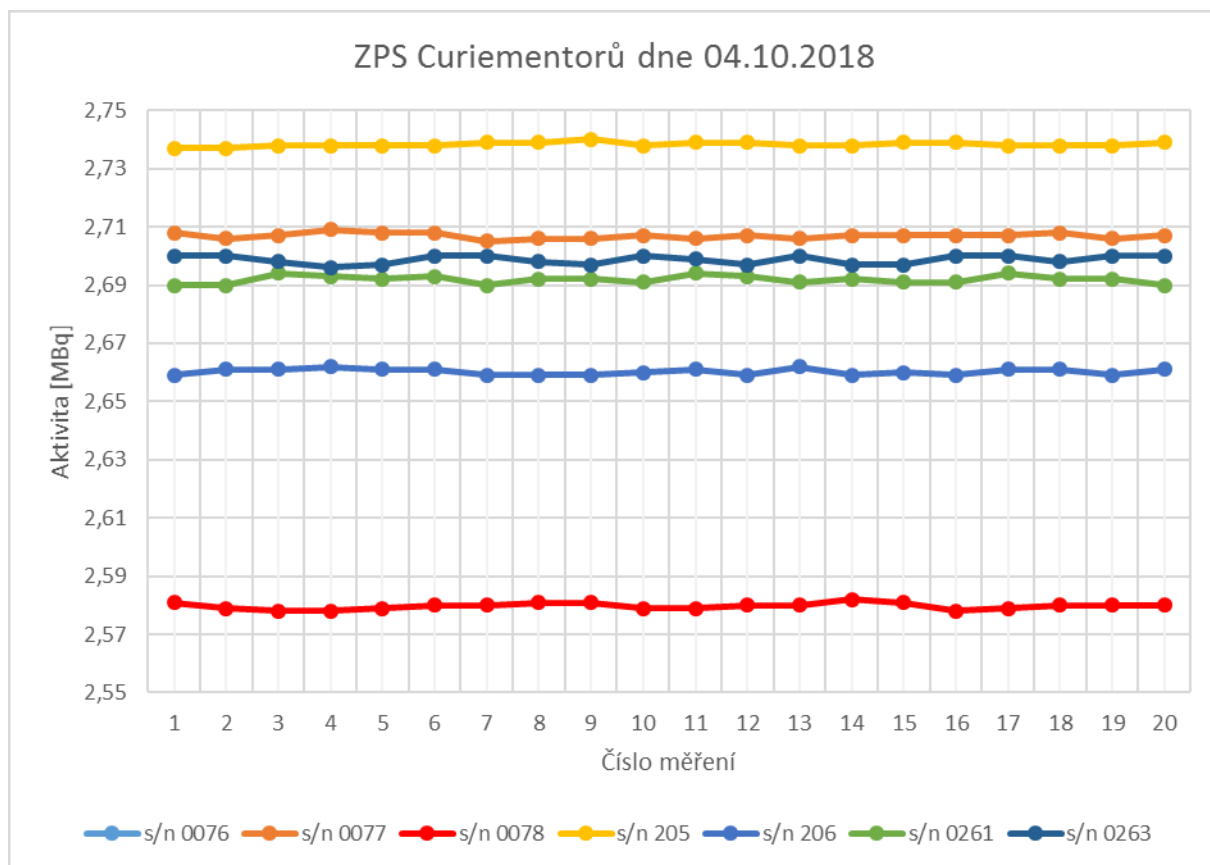
z distribuční funkce rozdělení, určení jejich difference  $\Delta = R_{50}$  a následným výpočtem limitních hodnot (18, 19):

$$x_{\min} = x_{0,25} - 1,5\Delta$$

$$x_{\max} = x_{0,75} + 1,5\Delta$$

Případné odlehlé hodnoty leží mimo pásmo limitních hodnot.

Testy na extrémní hodnoty lze pomocí makra MS Excel dále zautomatizovat [56][57]. Jelikož se v případě automatizace sběru dat prostřednictvím CuriementorLoggeru nedá v souboru předpokládat výskyt hrubých chyb (jak tomu je u ručního zpracování, Tab. 5), je navržené řešení testováno na extrémní hodnoty pouze dle pravidla  $\pm 3\sigma$ . V případě, že se extrémní hodnota v souboru přesto vyskytne, je na ni obsluha pomocí podmíněného formátování buňky upozorněna. Navržená metodika dále předpokládá ignorování prvních pěti naměřených hodnot každého souboru (toto opatření reflektuje doporučení [21] a je prováděno z důvodu ustálení dějů v komoře) a vypočtení parametrů dle vzorců (10), (12) a (13). Do grafů ZPS jsou dle požadavků zadavatele vynášeny aritmetické průměry změřených aktivit (obr. 27). Pro potřeby testů dlouhodobé stability jsou zpracovávány hodnoty z jednotlivých ZPS.



Obr. 27: Křivky měření ZPS.

Náhled tabulky CuriementorStat je uveden v příloze.

## 7 Cenová kalkulace

Cenová kalkulace výroby vychází z nákladů na fyzickou realizaci funkčního vzorku, ostatní náklady (např. čas potřebný pro kompletaci, vývoj programů, eventuálně další externality) nejsou zohledněny. Ceny komponent nemusí reflektovat aktuální dostupnou nabídku na trhu.

Tab. 10: Položkový rozpočet.

<i><b>položka</b></i>	<i><b>cena vč. DPH [Kč]</b></i>
Napěťový regulátor 3.3 V	50,00
Převodník UART RS232/TTL	100,00
Modul Wi-Fi ESP-WROOM-02	80,00
Přístrojová krabice	50,00
Konektory RJ, USB, Cannon	50,00
Pasivní a aktivní prvky	50,00
Napájecí zdroj + USB kabel	100,00
DPS (zakázková výroba)	20,00
<b>CELKEM</b>	<b>500,00</b>

Souhrnně se náklady na výrobu 6 kusů funkčních vzorků k období tvorby této práce pohybují v částce cca 3.000,00 Kč. Nezbytným zařízením nutným k provozu je přenosné zařízení s OS na platformě MS Windows, konkrétně je užito tabletu, který je zároveň nejnákladnější položkou. Je však zřejmé, že lze využít stávajícího zařízení, případně toto přenosné zařízení využívat i k jiným účelům.



Obr. 28: Vnější vzhled funkčního vzorku.



## 8 Legislativa a bezpečnost

Legislativní rámec použití dávkového kalibrátoru Curiementor určují zejména zákony č. 505/1990 Sb. *o metrologii* [58], zákon č. 268/2014 Sb. *o zdravotnických prostředcích a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů* [59] a zákon č. 263/2016 Sb. *Zákon atomový zákon* [24], dříve pak zákon č. 18/1997 Sb. *o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření* (atomový zákon). Při uvedení na tuzemský trh musí přístroj splňovat požadavky zákona č. 22/1997 Sb. *o technických požadavcích na výrobky* [60]. Za legislativní lze označit i interní předpisy [21][22].

Kontrolou dodržování výše uvedených zákonů jsou pověřeni Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), Státní úřad pro kontrolu léčiv (SÚKL) a Český metrologický institut (ČMI).

Před uvedením na vnitřní trh EU je přístroj posuzován procesem shody. Ačkoliv je Curiementor zdravotnickým prostředkem (MDD) a je zařazen do třídy rizika IIb, není konstruován pro přímý kontakt s pacientem [13]. Výrobce v technické dokumentaci [17] vymíní připojení k ostatním periferiím (PC, tiskárna) pouze za předpokladu, že tyto musí splňovat normu IEC 60950 [61].

Z hlediska elektrické bezpečnosti je přístroj Curiementor zařízením třídy ochrany I, vyžaduje tedy napájecí šňůru s ochranným vodičem (třížilové zapojení). Jelikož se jedná o zdravotnický prostředek, pravidelné elektrické revize se nevyžadují, postačuje tzv. *elektrická kontrola*, která je součástí pravidelné BTK.

BTK a metrologické ověření probíhají dodavatelsky. První výše uvedenou zkoušku zajišťuje v ročním intervalu výhradní zástupce dodavatele pro ČR, firma *Cannbera-Packard*, druhou pak ČMI. Ověření přístroje spočívá v porovnání měřících vlastností komory s etalonem <sup>137</sup>Cs. Platnost ověření je dána zákonem 505/1990 Sb.<sup>32</sup>, četnost provádění stanovuje příloha vyhlášky č. 345/2002 Sb. v bodě 8.2 „*Měřidla aktivity diagnostických a terapeutických preparátů aplikovaných in vivo pacientům*“ každoročně [62].

Z hlediska připojení přípravku CuriementorLogger k přístroji Curiementor nedochází ke změně parametrů přístroje (do samotného přístroje ani jeho firmware není nikterak zasahováno), dle zákona č. 268/2014 Sb. nedochází tedy k jeho modifikaci ani k vytváření nové sestavy zdravotnického prostředku, neboť CuriementorLogger zdravotnickým prostředkem není [63].

---

<sup>32</sup> Ověření, u kterého se nevystavuje ověřovací list, je dle zákona platné dva kalendářní roky a jeho platnost se počítá od 1. ledna roku následujícího po tomto ověření. Hypoteticky je tak možné (při ověření zpočátku kalendářního roku) dosáhnout jeho tříleté platnosti. K přístrojům Curiementor se však ověřovací list vydává.

## 9 EMC a zabezpečení dat

Z hlediska elektromagnetické kompatibility vyhovují přístroje Curiementor požadavkům normy IEC 60601-1-2/EN 60601-1-2 „Elektromagnetická kompatibilita – Lékařská elektrická zařízení“, vyzařované radiové interference odpovídají třídě B dle normy CISPR11EN55011 [13].

Funkční vzorek dataloggeru neobsahuje žádné prvky, které by mohly z hlediska EMC výraznějším způsobem ovlivnit jiná elektronická zařízení. Obvod je sestaven z komerčně dostupných integrovaných obvodů, vyzařování stabilizátorem napětí ani převodníkem nelze předpokládat, obvod vysílače – přijímače ESP-WROOM-02 je certifikován dle FCC i CE [64] a vyhovuje z hlediska nežádoucího vyzařování (možný posun frekvencí a maximální vysílaný výkon). Veškerá elektronika je vestavěna do stíněné hliníkové přístrojové krabičky. Komunikace s přístrojem po datovém kabelu probíhá za velmi nízkých přenosových rychlostí, nelze tedy předpokládat nežádoucí vyzařování. Externí napájecí zdroj musí být volen tak, aby pakliže je užito spínaného zdroje, tento nebyl předmětem rušení.

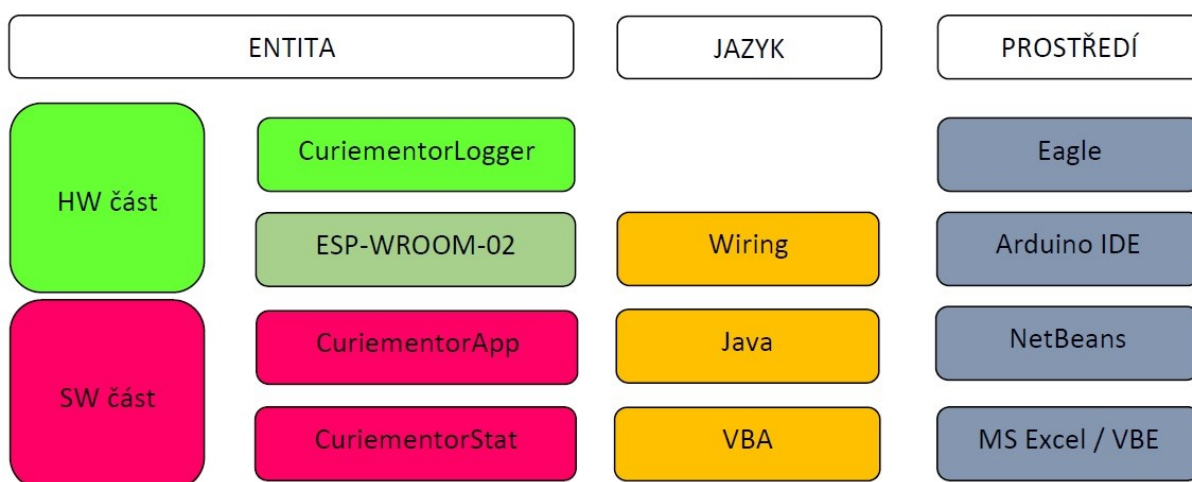
Z hlediska případného ovlivnění ostatními zařízeními není nutné přijímat žádná dodatečná opatření ve formě stínění či filtrace [65][66].

Bezdrátová komunikace standardu 802.11b, resp. 802.11g může být v případě zahlcení spektra náchylná ke kolizím či ztrátě spojení. V takovém případě je pak měření či export dat nutno opakovat.

Z hlediska bezpečnosti dat nemá funkční vzorek implementován žádný druh zabezpečení, ale použité obvodové řešení s modulem ESP-WROOM-02 umožňuje dodatečné zabezpečení komunikace standardy WPA, WPA2 a šifrováním. Vzhledem k charakteru přenášených informací, omezenému vysílacímu výkonu modulu a užitím uvnitř budovy tvořené železobetonovým skeletem není otázka zabezpečení dat aktuální.

## 10 Diskuze

V rámci řešení praktické části této práce bylo nutné se seznámit se s fyzickou podstatou komunikačního protokolu přístroje Curiementor, dále s možnostmi a současnými trendy drátové i bezdrátové komunikace, na nepájivém poli byla odzkoušena funkcionality zapojení a obousměrná komunikace, následně byla realizována experimentální část s využitím vývojové platformy Arduino. Po vyhodnocení bylo navrženo finální obvodové řešení. Návrh schématu a podklady pro výrobu DPS byly vytvořeny v CAM editoru schémat a DPS *Eagle*, výroba konečné podoby DPS byla svěřena zahraničnímu dodavateli. Po osazení DPS následovalo oživení dataloggeru – implementace sketchu pro modul Wi-Fi, napsaného v jazyce *Wiring* v prostředí *Arduino IDE*. Vlastní program včetně grafického rozhraní *CuriementorApp* je vytvořen v jazyce *Java* a vývojovém prostředí *NetBeans*. Návrh statistické části *CuriementorStat* je realizován v *MS Excel* a výhledem na zautomatizování v makru (prostředí *VBE*).



Obr. 29: Diskuze.

Nad rámec zadání této diplomové práce se podařilo realizovat bezdrátovou konektivitu přenosu dat z přístroje Curiementor do přenosného zařízení a grafické ovládání obslužného programu. Ve fázi rozpracovanosti je makro MS Excel, které dokáže zautomatizovat činnosti spojené se statistickým zpracováním získaných dat.

Naopak k dořešení v případě rutinního nasazení zbývá obsluha chybových hlášení, vyladění grafické podoby GUI a úprava, resp. dokončení prezentace výsledných dat v MS Excel dle požadavků zadavatele.

## Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a sestavit funkční vzorek zařízení (dataloggeru) ke sběru dat (naměřených hodnot aktivity radioizotopů) z přístrojů Curiementor, které jsou rozmístěny v prostorách ONM FN Hradec Králové s následným vytvořením metodiky pro statistické vyhodnocení.

Experimentální datalogger byl řešen jako metalicky připojitelný interface na bázi jednodeskového mikrokontroléru, který ukládal měřené hodnoty do své interní paměti. Tento proces probíhal cyklicky u všech měřených přístrojů, limitem užití bylo pouze naplnění vnitřní paměti. Nevýhodou tohoto řešení byla nutnost fyzického propojování přístroje a dataloggeru s každým jednotlivým měřením, nemožnost uživatelsky nastavit alespoň základní parametry měření a složitá, resp. nemožná analýza případných poruchových stavů.

Finální řešení funkčního vzorku je tvořeno HW částí (dataloggerem), která zabezpečuje konverzi napěťových úrovní standardu RS-232 do úrovní TTL a následný on-line bezdrátový přenos signálu prostřednictvím Wi-Fi modulu, který je konfigurován jako access point. SW rutina pro MS Windows, nahraná v komerčně dostupném přenosném zařízení zajišťuje výběr bezdrátové sítě, uživatelskou volbu nastavení základních parametrů měření, informaci o aktuálním statusu zařízení, uložení naměřených dat do předem definované adresářové struktury a zobrazení případných chybových hlášení.

Data jsou v obou případech následně exportována do souboru \*.csv, v prostředí MS Excel v přehledné tabulce zobrazena a graficky vykreslena. Rovněž jsou spočteny základní statistické veličiny. V řešení je automatizace tohoto procesu pomocí makra.

Zvolená koncepce SW řešení postavená na platformě MS je výhodná z hlediska podpory systému a očekávané (resp. požadované) funkčnosti i na budoucích verzích přenosných zařízení. Nativní aplikace pro MS Windows sice omezuje své použití na mobilní zařízení s podporou tohoto OS, ale při předpokládaném nasazení jednoho kusu sběrného zařízení (přenosného počítače) toto řešení nepředstavuje problém. Využití MS Excelu pro vyhodnocení dat je naopak nespornou výhodou.

Logicky jsou však výše uvedené SW části na sobě nezávislé a teoreticky mohou fungovat na rozličných platformách. Jedinou podmínkou je zachování \*.csv formátu souboru na výstupu dataloggeru, resp. vstupu do vyhodnocovací aplikace.

Přínos této diplomové práce spočívá v automatizaci rutinních kontrol ve skutečném provozu zdravotnického zařízení, které je z hlediska požadavků platné legislativy i interního systému kvality povinen personál v pravidelných intervalech provádět. Z hlediska programu kvality je přínosem rychlost zpracování a eliminace chybovosti, která byla v případě manuálního měření, tj. odečítání dat z displaye, jejich ručního zápisu, následného čtení a vkládání do tabulkového procesoru značná.

Návrh projektu reflektuje požadavek na jednoduchost a cenovou dostupnost, z uživatelského hlediska pak „user friendly“ ovládání.

Po důkladném odzkoušení zařízení na pracovištích FN Hradec Králové a dopracování makra pro MS Excel je zvažována prezentace vytvořeného řešení širšímu spektru odborné veřejnosti se záměrem rozšíření i pro ostatní centra v ČR.

## Literatura

- [1] WIKISKRIPTA. *Radionuklid* [online]. Poslední revize 18.01.2018 [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Radionuklid>
- [2] ULLMANN, Vojtěch. *Radionuklidy* [online]. [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>
- [3] *Veličiny a jednotky* [online]. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/veliciny\\_5.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/veliciny_5.html)
- [4] WIKISKRIPTA. *Radioimunoanalýza (RIA)* [online]. Poslední revize 28.06.2018 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Radioimunoanal%C3%BDza\\_\(RIA\)](https://www.wikiskripta.eu/w/Radioimunoanal%C3%BDza_(RIA))
- [5] ULLMANN, Vojtěch. *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření* [online]. [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [6] RODÁK, Martin. *Online detekce ionizujícího záření na neutronovém zdroji NG-2* [online]. Plzeň: 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/26840/1/Diplomova\\_prace\\_Martin\\_Rodak.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/26840/1/Diplomova_prace_Martin_Rodak.pdf)
- [7] PECINOVÁ, Drahomíra. *Soubor přednášek radiační ochrany v nukleární medicíně*. Hradec Králové, 2018.
- [8] *Gas Detectors* [online]. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://www0.mi.infn.it/~sleoni/TEACHING/Nuc-Phys-Det/PDF/Lezione-partI-5-gas-det.pdf>
- [9] *Ionization Chambers* [online]. Poslední revize 31.09.2007 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.ornl.gov/ptp/collection/ionchamber/introionizationchamberr.htm>
- [10] *Introduction to Radiation Detectors* [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://www.equipcoservices.com/support/tutorials/introduction-to-radiation-monitors/>
- [11] *Propagační materiál k přístroji Curiementor* [online]. Freiburg: PTW Freiburg, poslední revize D808.139.0/0 z 07/2006 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: [https://www.ptw.de/typo3conf/ext/naw\\_securedl/secure.php?u=0&file=ZmlsZWZkbWluL2lu dGVybmfscy9udWNsX21lZC9DVVJJRU1FTIRPUI9Cm9fZW5fODA4MTM5MDBfMDA ucGRm&t=1528460135&hash=3cb692db7dda63653af01475a8d2f8e9](https://www.ptw.de/typo3conf/ext/naw_securedl/secure.php?u=0&file=ZmlsZWZkbWluL2lu dGVybmfscy9udWNsX21lZC9DVVJJRU1FTIRPUI9Cm9fZW5fODA4MTM5MDBfMDA ucGRm&t=1528460135&hash=3cb692db7dda63653af01475a8d2f8e9)
- [12] *Ionizing radiation detectors* [online]. Freiburg: PTW Freiburg, poslední revize D165.229.00/08 z 12/2014 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: [http://www.emf-japan.com/ptw/img/PDF/PTW\\_all\\_detectors.pdf](http://www.emf-japan.com/ptw/img/PDF/PTW_all_detectors.pdf)
- [13] *Uživatelský manuál Curiementor 3/4 Model T12001, T12002, T12004*. Freiburg: PTW Freiburg, poslední revize D610.131.0/0 z 07/2001.
- [14] *Instruction Manual for Use on Curiementor-E valid from serial No. 7824-001*. Freiburg: PTW Freiburg, poslední revize D302.131.0/1 z 09/1995.
- [15] *Curiementor 2 Instruction Manual valid for Ser.No. 500 or later and Firmware-Version 6.2 or later* [online]. Freiburg: PTW Freiburg, poslední revize D276.131.0/9 z 02/2007. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z:

- [http://www.ptw-usa.com/typo3conf/ext/naw\\_securedl/secure.php?u=0&file=ZmlsZWFKbWluL2ludGVybmFs cy9udWNsX21lZC9tYW5fc3BIYy9DVVJJRU1FTIRPU18yX1NONTAwX0ZXNi0yX01hbl9l bl8yNzYxMzEwMF8wOS5wZGY=&t=1498291590&hash=e910fe1bc76682ffcf22c430eaf57 227](http://www.ptw-usa.com/typo3conf/ext/naw_securedl/secure.php?u=0&file=ZmlsZWFKbWluL2ludGVybmFs cy9udWNsX21lZC9tYW5fc3BIYy9DVVJJRU1FTIRPU18yX1NONTAwX0ZXNi0yX01hbl9l bl8yNzYxMzEwMF8wOS5wZGY=&t=1498291590&hash=e910fe1bc76682ffcf22c430eaf57 227)
- [16] *Дозкалибратор Curiementor 4* [online]. [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <http://phct.ru/dozkalibrator-curiementor-4/>
- [17] *User Manual Curiementor 3/4 RS232 Interface* [online]. Freiburg: PTW Freiburg, poslední revize D704.131.01/02 z 10/2006 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: [http://www.ptw-usa.com/typo3conf/ext/naw\\_securedl/secure.php?u=0&file=ZmlsZWFKbWluL2ludGVybmFs cy9udWNsX21lZC9tYW5fc3BIYy9DVVJJRU1FTIRPU18yXzRfUIMyMzJfTWFuX2VuXzcwNDEzMTEwMTAxXzAyLnBkZg==&t=1498631336&hash=027ad3e1f973a4ce23f74960cf90615c](http://www.ptw-usa.com/typo3conf/ext/naw_securedl/secure.php?u=0&file=ZmlsZWFKbWluL2ludGVybmFs cy9udWNsX21lZC9tYW5fc3BIYy9DVVJJRU1FTIRPU18yXzRfUIMyMzJfTWFuX2VuXzcwNDEzMTEwMTAxXzAyLnBkZg==&t=1498631336&hash=027ad3e1f973a4ce23f74960cf90615c)
- [18] *КРАТКО РЪКОВОДСТВО ЗА РАБОТА СЪС СОФТВЕРА* [online]. 2012 [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <http://metroion.com/wp-content/uploads/2012/09/Manual-brief-PTW-Curiementor-3-software.pdf>
- [19] *RS232 Pinout* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://www.usconverters.com/index.php?main\\_page=page&id=61](http://www.usconverters.com/index.php?main_page=page&id=61)
- [20] *Systém zabezpečení jakosti na pracovištích nukleární medicíny – přístrojová technika*. Zbraslav: SÚJB Ústav jaderných informací Zbraslav. Květen 1999.
- [21] *Kontrola měřidel aplikované aktivity – linearita odezvy na aktivitu*. Hradec Králové. Fakultní nemocnice Hradec Králové, interní dokument FN HK.
- [22] *Kontrola měřidel aplikované aktivity – pozadí, krátkodobá a dlouhodobá stabilita*. Hradec Králové. Fakultní nemocnice Hradec Králové, interní dokument FN HK.
- [23] ROZLÍVKA, Zdeněk. *Radiační ochrana na pracovištích s diagnostickými rentgeny ve zdravotnictví*. Pardubice: UNIT s.r.o., 2017, učební texty kurzu.
- [24] Zákon č. 263/2016 Sb. *Zákon atomový zákon* [online]. [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-422?text=263%2F2016>
- [25] Vyhláška č 422/2016 Sb. *Vyhláška radiační ochrany a zabezpečení radionuklidového zdroje* [online]. [cit. 2019-01-18]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-422>
- [26] SUHAIB, Alameen et al. *Assessment of Dose Calibrators Performance in Nuclear Medicine Department in Sudan* [online]. Sudan: 2016, ISSN 2320-4026. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://saspublisher.com/wp-content/uploads/2016/07/SAJP-56245-250.pdf>
- [27] ČERNOHORSKÝ, Jindřich a kolektiv. *Systémy monitorování a řízení*, Ostrava: VŠB-TUO, 2013, vydání 1., ISBN 978-80-248-3106-0.
- [28] *Jednočipové mikropočítače* [online]. [cit. 2019-01-17]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap9/jednocpoc.html>
- [29] *UART Baud Rate: How Accurate Does It Need to Be?* [online]. [cit. 201-04-04]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-uart-baud-rate-clock-how-accurate-does-it-need-to-be/>



- [30] *Sériová linka RS-232* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/rozhrani/hw-server-predstavuje-seriova-linka-rs-232.html#urovne>
- [31] *IoT Standards and Protocols* [online]. Poslední revize 05.01.2019 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>
- [32] ČÍŽ, Radim. *Parametry infračerveného přenosu* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02070/index.html>
- [33] *Co je to WiFi – úvod do technologie* [online]. Poslední revize 21.06.2003 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/produkty/ethernet/co-je-to-wifi-uvod-do-technologie.html>
- [34] BROŽ, Kamil. *Uživatelská aplikace pro konfiguraci bezdrátového modulu Zigbee* [online]. Brno: 2012. Diplomová práce. VUT v Brně [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53784](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53784)
- [35] KOTON, J. a kolektiv: *Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace Zigbee* [online]. Poslední revize 18.04.2006 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cislocanku=2006032001>
- [36] *Převodník TTL RS232* [online]. [cit. 2018-09-26]. Dostupné z: [https://arduino-shop.cz/arduino/1334-prevodnik-rs232-na-ttl-modul-com-max232cpe-1466290214.html?gclid=EAIaIQobChMI9LDWjfOG3wIVDeh3Ch1BwQjtEAYYASABEgKs4vD\\_BwE](https://arduino-shop.cz/arduino/1334-prevodnik-rs232-na-ttl-modul-com-max232cpe-1466290214.html?gclid=EAIaIQobChMI9LDWjfOG3wIVDeh3Ch1BwQjtEAYYASABEgKs4vD_BwE)
- [37] *Arduino* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [38] GABERLE, Stanislav. *Signalizace opuštění patientského lůžka*. Kladno: 2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství.
- [39] BUMBA, Jiří. *Programování mikroprocesorů: praktický návod nejen pro mikroprocesory PIC*. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-2838-1
- [40] *UART Communication Protocol – How it works?* [online]. Poslední revize 26.07.2018 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.codrey.com/embedded-systems/uart-serial-communication-rs232/>
- [41] *Compact RS232 to TTL converter* [online]. Poslední revize 10.02.2019 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://www.doc-diy.net/electronics/rs232plug/>
- [42] *Kompaktní převodník úrovní TTL/RS232* [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/dalsi/prevodnik.htm>
- [43] Maxim Integrated Products. *+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers* [online]. Katalogový list, rev. 9 z 04/2000 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.433-100.1.pdf>
- [44] *ESP32 (26)-UART* [online]. Poslední revize 11.06.2017 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.lucadentella.it/en/2017/11/06/esp32-26-uart/>
- [45] Espressif Systems. *ESP-WROOM-02 Datasheet* [online]. Katalogový list, ver. 2.9, 2018 [cit. 2018-09-26]. Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0c-esp-wroom-02\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0c-esp-wroom-02_datasheet_en.pdf)

- [46] Implementing a Wireless console using JeeLabs' esp-link [online]. Poslední revize 26.03.2016 [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://esp8266hints.wordpress.com/tag/esp-wroom-02/>
- [47] ESP8266 Community Forum [online]. [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://www.esp8266.com/viewtopic.php?f=26&t=15458>
- [48] WiFi vývojová deska ESP-WROOM-02 [online]. Eclipsa s.r.o.: 2018 [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://arduino-shop.eu/docs/produkty/0/572/1501226104.pdf>
- [49] Getting Started with ESP-WROOM-02 [online]. [cit. 2018-09-30]. Dostupné z: <https://learn.edwinrobotics.com/getting-started-with-esp-wroom-02/>
- [50] Texas Instruments. LM3940 1-A Low-Dropout Regulator for 5-V to 3.3V Conversion [online]. Katalogový list, rev. 02/2015, [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3940.pdf>
- [51] PECINOVSKÝ, Rudolf. *Myslíme objektově v jazyku Java*. Praha: Grada Publishing, 2008, vydání 2., ISBN 9788024726553.
- [52] STINSON, Craig, DODGE, Mark. *Mistrovství v Microsoft Office Excel 2003*. Brno: CP Books, 2005, s. 888. ISBN 80-251-0669-1.
- [53] LITSCHMANNOVÁ, Martina. *Úvod do statistiky*. Ostrava: VŠB-TUO, 2011.
- [54] MOC, Lubomír. *Extrémní hodnoty a analýza výběrových souborů* [online]. 30.10.2014 [cit. 2019-04-11]. Přednáška KVM Inženýrská statistika. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12534360/>
- [55] Empirical rule – The 68-95-99,7 Rule [online]. 05.12.2008 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://bookofthrees.com/empirical-rule-the-68-95-997-rule/>
- [56] HENZL, Ctibor. *Výpočet nejistoty měření v Excelu* [online]. 01.03.2002 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02016/index.html>
- [57] How to Calculate 3 Sigma – Formula, Example [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.easycalculation.com/statistics/learn-three-sigma.php>
- [58] Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii [online]. [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505>
- [59] Zákon č. 268/2014 Sb. o zdravotnických prostředcích a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů [online]. [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-268>
- [60] Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky [online]. [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <https://zakonyprolidi.cz/cs/1997-22>
- [61] International Electrotechnical Commission. *International standard IEC 60950-1*. Rev. 2, 12/2005.
- [62] Vyhláška č. 345/2002 Sb. *Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu, kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu* [online]. [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-345>



- [63] KRÁL, Jakub a kolektiv. *Zákon o zdravotnických prostředcích: Komentář*. Praha: Wolters Kluwer, 2016, s. 456. ISBN 978-80-7552-415-7
- [64] Espressif Systems (Shanghai) Pte. Ltd., *Test report FCC ID 2AC7Z-ESPWROOM32*[online]. Poslední revize 18.12.2017 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://fccid.io/2AC7Z-ESPWROOM32/Test-Report/Test-Report-3212932>
- [65] VEJROSTA, Vladimír. *Konstrukce zdravotnických elektrických přístrojů: Aplikace požadavků mezinárodních norem*. Praha: Česká společnost pro zdravotnickou techniku, 1995, s. 86. ISBN 80-02-01049-3.
- [66] VACULÍKOVÁ, Polina, VACULÍK, Emil a kolektiv. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. Praha: Grada Publishing, 1998, vydání 1., s. 504, ISBN 80-7169-568-8.

## Seznam příloh

- 1 Vývojový diagram programu CuriementorApp (pouze na datovém nosiči)
- 2 Zdrojové soubory programu Eagle ve formátech \*.sch, \*.brd (pouze na datovém nosiči)
- 3 Zdrojový kód programu modulu ESP-WROOM-02 (pouze na datovém nosiči)
- 4 Zdrojový kód programu CuriementorApp (pouze na datovém nosiči)
- 5 Tabulka MS Excel CuriementorStat (pouze na datovém nosiči)